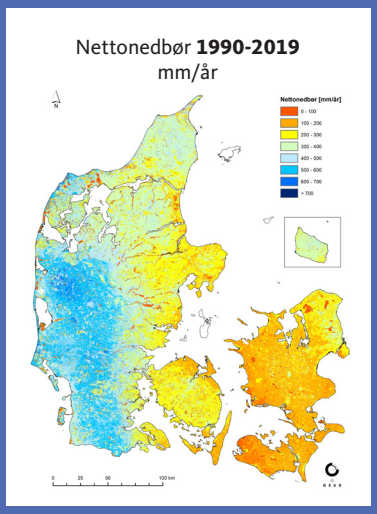
DOKUMENTATIONSSRAPPORT
MODELLEVERANCER TIL HYDROLOGISK INFORMATIONS- OG PROGNOSESYSTEM

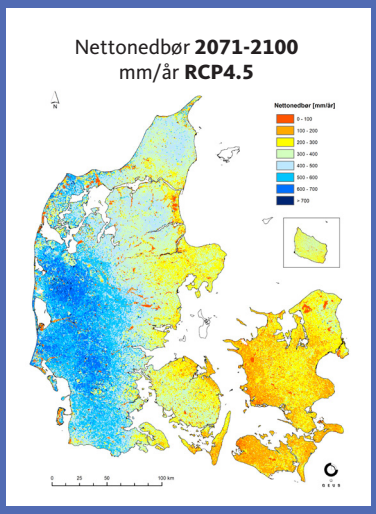
Udvikling af landsdækkende modelberegninger af terrænnære hydrologiske forhold i 100m grid ved anvendelse af DK-modellen:

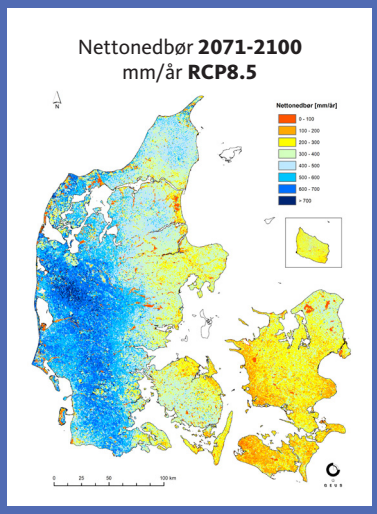
Dokumentationsrapport vedr. modelleverancer til Hydrologisk Informations- og Prognosesystem

Udarbejdet som en del af DEN FÆLLESOFFENTLIGE DIGITALISERINGSSTRATEGI 2016-2020
INITIATIVET FÆLLES DATA OM TERRÆN, KLIMA OG VAND

Henriksen HJ, Kragh SJ, Gotfredsen J, Ondracek M, van Til M, Jakobsen A, Schneider RJM, Koch J, Troldborg L, Rasmussen P, Pasten-Zapata E og Stisen S (2020)







DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER
FOR DANMARK OG GRØNLAND
KLIMA-, ENERGI- OG FORSYNINGSMINISTERIET

G E U S

Udvikling af landsdækkende modelberegninger af terrænnære hydrologiske forhold i 100m grid ved anvendelse af DK-modellen:

Dokumentationsrapport vedr. modelleverancer til Hydrologisk Informations- og Prognosesystem

Udarbejdet som en del af DEN FÆLLESOFFENTLIGE DIGITALISERINGSSTRATEGI 2016-2020
INITIATIVET FÆLLES DATA OM TERRÆN, KLIMA OG VAND

Henriksen HJ, Kragh SJ, Gotfredsen J, Ondracek M, van Til M, Jakobsen A, Schneider RJM, Koch J, Troldborg L, Rasmussen P, Pasten-Zapata E og Stisen S (2020)

DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER
FOR DANMARK OG GRØNLAND
KLIMA-, ENERGI- OG FORSYNINGSMINISTERIET

G E U S

Indholdsfortegnelse

Ordliste **5**

Forord **6**

1. Modelopstilling **7**

1.1. Data og metoder 500m / 100m opstilling ... 7
1.1.1. Arealanvendelse input ... 8
1.1.2. Jordarts input ... 11
1.1.3. Vandløb og søer ... 12
1.1.4. Aggregering af geologiske lag / beregningslag ... 15
1.1.5. Indvindinger og markvanding ... 18
1.1.6. Numeriske parametre ... 20
1.1.7. Udvælgelse og modelopsætning af submodeller (100 m) ... 21
1.2. Kalibrering, validering og performance ... 23
1.2.1. Kalibreringskoncept DK-model HIP 500 m ... 23
1.2.2. Parametriserings- og kalibreringskoncept DK-model HIP 100 m ... 24
1.2.3. Valideringskoncept DK-model HIP 500 m/100 m ... 26
1.2.4. Valg og bearbejdning af kalibreringsdata ... 26
1.2.5. Databehandling af pejledata ... 26
1.2.6. Databehandling af sødata ... 30
1.2.7. Databehandling af vandføringsdata ... 30
1.2.8. Opstilling af kalibreringsmål og nøjagtighedskriterier ... 32
1.2.9. Nøjagtighedsmål for trykniveaudata ... 34
1.2.10. Nøjagtighedsmål for vandføringsdata ... 35
1.2.11. Observationsgruppe for markvanding ... 37
1.2.12. Samlet objektivfunktionen ... 37
1.3. Resultater af kalibrering og validering ... 40
1.3.1. Kvantitativ vurdering af trykniveau simuleringer ... 40
1.3.2. Kvantitativ vurdering af vandførings simuleringer ... 46
1.3.3. Kvalitativ vurdering af rummelige residualer ... 48
1.3.4. Vandbalance udtræk ... 66
1.4. Anvendelse af 100m model til modelberegninger (1990-2019) ... 68
1.4.1. Usikkerhed på simuleringer ... 68

2. Klimafremskrivning af 500m modeller **74**

2.1. Klimamodeller ... 74
2.2. Hydrologiske klimafremskrivninger ... 75
2.2.1. Havniveaustigninger ... 77
2.2.2. Hot start ... 80

3. Efterbearbejdning af modelsimuleringer 82

3.1. Beskrivelse af statistisk efterbearbejdning ... 82
3.2. Bearbejdning af randbetingelser ... 87

4. Nedskalering af klimafremskrivninger til 100m 89

4.1. Introduktion til Random Forest (RF) ... 89
4.2. Datagrundlag ... 90
4.3. Beskrivelse af RF-algoritme til nedskaleringen ... 93

5. ML baseret estimering af dybde til terrænnært grundvand 103

5.1. Datagrundlag ... 103
5.2. Modelspecifikationer ... 106
5.3. Modelopsætning ... 107
5.4. Performance ... 109

6. Dataleverancer og metadatabeskrivelser 116

6.1. 100m model for historisk periode 1990 – 2019 ... 117
6.2. Klimafremskrivninger for RCP4.5 og RCP8.5 ... 120
6.3. Nedskalering af klimafremskrivninger til 100m ... 124
6.4. ML 10m model af dybde til terrænnært grundvand ... 125
6.5. Randbetingelser til lokalmodeller ... 126

7. Reference liste 131

Ordliste

DK-model HIP	HIP4Plus hydrologiske modeller. I projektet er det opstillet to modeller i hhv. 500m og 100m diskretisering.
DK-model2019	Den Nationale Vandressourcemodel (Stisen, Ondracek, et al. 2019).
Terrænært grundvand	Det hydrauliske trykniveau imellem terræn og 10 m dybde.
Dybt grundvand	Det hydrauliske trykniveau i over 10 m dybde.
Dybde til terrænnært grundvand	Defineret i HIP som det første vandspejl man træffer fra oven. Det øverste grundvandsspejl refererer til den numeriske definition jf. MIKE SHE af det første vandspejl der definerer et (temporært) vandmættet vandførende lag. Jf. MIKE SHE det øverste beregningslag i modellen, hvori der optræder et >=2 cm dybt STATISK sammenhængende vandmættet lag, betegnes som det øverste grundvandsspejl (selv om et evt. kun optræder få dage eller uger om vinteren). Udtrækkes i MIKE SHE med "phreatic depth variablen".
Vandindhold i rodzonen	Vandmængden i rodzonen [m^3/m^3]. I MIKE SHE er variationen i jordfugten styret af nedbør, fordampning og den årlige variation i rodzonens dybde.
Q-hændelser	Overskridelses sandsynlighed. En Q01 af en høj grundvandsstand der overskrides 1% af tiden. En Q99 af en lav grundvandsstand der overskrides 99% af tiden.

Forord

Rapporten omhandler modelleringsarbejdet i tilknytning til HIP4Plus, der omfatter udviklingen af landsdækkende modelberegninger af terrænnære hydrologiske forhold i både 500m og 100m grid ved anvendelse af DK-modellen. Heri indgår overvejelser og beslutninger, med fokus på tilpasning og udbygning af DK-model til en landsdækkende 500m/100m model som simulerer daglige historiske beregninger for perioden 1990-2019, samt effekter af klimaforandringer og stigende havvandstand for de terrænnære hydrologiske forhold i nær og fjern fremtid. I projektet opdateres og videreudvikles den eksisterende DK-model2019 (Stisen, Ondracek, et al. 2019) til en DK-model HIP version i 500m og 100m grid. Det overordnede formål med HIP4Plus er at levere modelberegninger af dybden til terrænnært grundvand, vandføring i vandløb samt vandindhold i rodzonen i høj rumlig og tidslig opløsning baseret på både observeret historisk klima og klimafremskrivninger for to emissionsscenarier.

Den modelbaserede klimafremskrivning gennemføres for 22 klimamodeller (21 for Bornholm) på tværs af de to emissionsscenarier med DK-model HIP 500m. Efterfølgende nedskaleres de simulerede ændringer i dybden til terrænnært grundvand til 100m vha. af maskinlæring.

Som supplerende datasæt til det modelbaserede estimat for den historiske periode (1990-2020) i 100m gennemgår rapporten også en maskinlærings model der estimerer dybde til terrænnært grundvand i 10 m opløsning.

Rapporten vil primært omfatte de elementer der er ændret i forhold til DK-model2019 rapporten (Stisen, Ondracek, et al. 2019), efterfølgende henvist til som DK-model2019.

1. Modelopstilling

Alle modeller er opstillet i UTM zone 32 EUREF89 og modeltopografien er baseret på DHM raster på 1,6m (aggregeret til hhv. 10m, 100m og 500m), mens havbunden er fra GST/FVV batymetri model i 50m. Dette afsnit beskriver tilpasning og udbygning af DK-model2019 til DK-model HIP i både 500m og 100m grid. Den videreudviklede og opdaterede DK-model HIP i 500m er blevet opstillet og kalibreret i det hydrologiske modelleringssoftware, MIKE SHE/MIKE HYDRO (version 2019) og DK-model HIP i 100m er opstillet i MIKE SHE/MIKE HYDRO (version 2020 servicepakke 1).

Dette afsnit beskriver kun forskellene mellem DK-model2019 og DK-model HIP, hvorfor der henvises til DK-model2019 (Stisen, Ondracek, et al. 2019) for yderligere information om modellens opstilling.

1.1. Data og metoder 500m / 100m opstilling

Udviklingen af DK-model HIP 500m og 100m fokuserer på tre elementer: 1) øget rumlig opløsning af modelberegninger og resultater; 2) højst mulig konsistens mellem modelopsætninger og parametrisering i 500m og 100m; samt 3) øget fokus på den terrænnære hydrologi, særligt det terrænnære grundvand. Modellerne i 500m og 100m evalueres efter foreskrevne kriterier samt nye kriterier med særligt fokus på den terrænnære hydrologi.

Med ønsket om højere rumlig opløsning af DK-modellen, kræves en øget opløsning af modeldata inputtet. En væsentlig del af modelarbejdet omhandler derfor forbedring af input data og parametrisering i 100m opløsning. For at sikre konsistens mellem 500m og 100m modellerne udarbejdes ét fælles input datasæt i 100m opløsning til anvendelse i både 500m og 100m modellerne. Dette sikrer at 500m parametriseringen vil være et gennemsnit af 5 x 5 100m celler og dermed størst mulig overensstemmelse. Enkelte modelinput følger ikke dette koncept, som bl.a. vandløbsnetværket, som er udbygget i 100m modellen og kystafgrænsningen af alle inputdata, som varierer fra 500m til 100m opløsning. Bornholm opstilles udelukkende som en 100m model, da modellens opløsning i forvejen lå i 250m i DK-model2019, og der derfor ikke foreligger en 500m model for Bornholm.

I Tabel 1 fremgår de overordnede forskelle og opdateringer fra DK-model2019 til DK-model HIP samt de overordnet forskelle mellem DK-model HIP i 500m og 100m modeller. De følgende afsnit gennemgår opdateringer og udvidelser af data, samt de medfølgende ændringer af modelopsætningen siden DK-model2019.

Tabel 1: Oversigt med overordnede forskelle og opdateringer fra DK-model2019 500m til DK-model HIP 500m, samt forskelle og opdateringer fra DK-model2019 500m til DK-model HIP 100m.

Modelopsætning	DK-model2019	DK-model HIP 500m	DK-model HIP 100m
Arealanvendelse	23 arealanvendelser med kombinationer af vegetations- og jordtyper	28 arealanvendelser med kombinationer af vegetations- og jordtyper, 100m	Samme som DK-model HIP 500m
Kystafgrænsning 500m til 100m	Kystafgrænsning er defineret ud fra 500m grid	Kystafgrænsning er defineret ud fra 500m grid	Kystafgrænsning er defineret ud fra 100m grid
Jordarts klasseinddeling	5 jordart klasse inddeling, 500m grid	Opdateret med 9 nye jordart klasse inddeling, 100m grid	Samme som DK-model HIP 500m
Markvandingsarealer	Vandingsarealet (bufferzone omkring vandingsboringerne) er sat til 450 m	Vandingsarealet er sat til 450 m	Vandingsarealet er sat til 550m
Vandløb og søer	DK-model2019 vandløb	Justeret placering i eksisterende vandløbsnetværk	Udbygget vandløbsnetværk
Aggregering af geologiske lag	DK4-6 har 22/18 lag, 500m grid	DK4-6 har 11 lag	Samme som DK-model HIP 500m

1.1.1. Arealanvendelse input

I HIP4Plus projektet repræsenteres arealanvendelsen som én arealfordeling for hele den historiske periode i 100m opløsning. Fordelingen af arealtyper og differentieringen af afgrødetyper er baseret på hhv. BASEMAP2012 (Levin, Jepsen og Blemmer 2012) og landbrugsafgrøde-fordelingen per mark (LAFPM), fra Ministeriet for Fødevarer (Landbrug og Fiskeri 2020).

Arealanvendelseskortet indeholder en kombination af vegetations- og jordtypedata, som anvendes i et ”two-layer” modul af den umættede zone (DHI A/S 2020, s. 563 ff.), til beregning af den potentielle fordampning på baggrund af bladareal indeks (LAI), rodzonedybde (RZD), afgrødekoefficient (Kc) og infiltrationskapacitet.

Arealanvendelsen er opdelt i seks overordnede typer på basis af BASEMAP2012, **1)** *permanent græs,* **2)** *Skov,* **3)** *Hede/ringe vegetation,* **4)** *Søer og vandløb/hav,* **5)** *Befæstet og delvist befæstet arealer,* **6)** *Landbrug i omdrift.* For skovarealer skelnes der mellem løv- og nåleskov. Differentieringen overføres fra DK-model2019 til den nuværende fordeling af skovarealer i BASEMAP2012. Landbrugsarealer er underinddelt i fem grupper af afgrøder: Vinterafgrøder, Forårsafgrøder, græs i omdrift, majs og rodfrugter. Disse fem afgrødetyper er tilfældigt fordelt over landbrugsarealerne pr. kommune jævnfør LAFPM opgjort på kommuneniveau. For at inkludere efterafgrøder i modellen tilføjes 1,5 måneds vækstperiode for alle forårsafgrøder.

For alle vegetationstyper er der specificeret værdier for LAI, RZD og Kc. Den sæsonmæssige udvikling af LAI, RZD og Kc varierer for hver enkelt vegetationstype, dog er dynamikken for samme afgrøde bibeholdt for LAI og Kc, mens RZD varierer med jordtypen. På basis af antagelsen om, at rodzoneudviklingen primært er bestemt af jordtypen og i mindre grad af den aktuelle afgrøde, er arealtypen

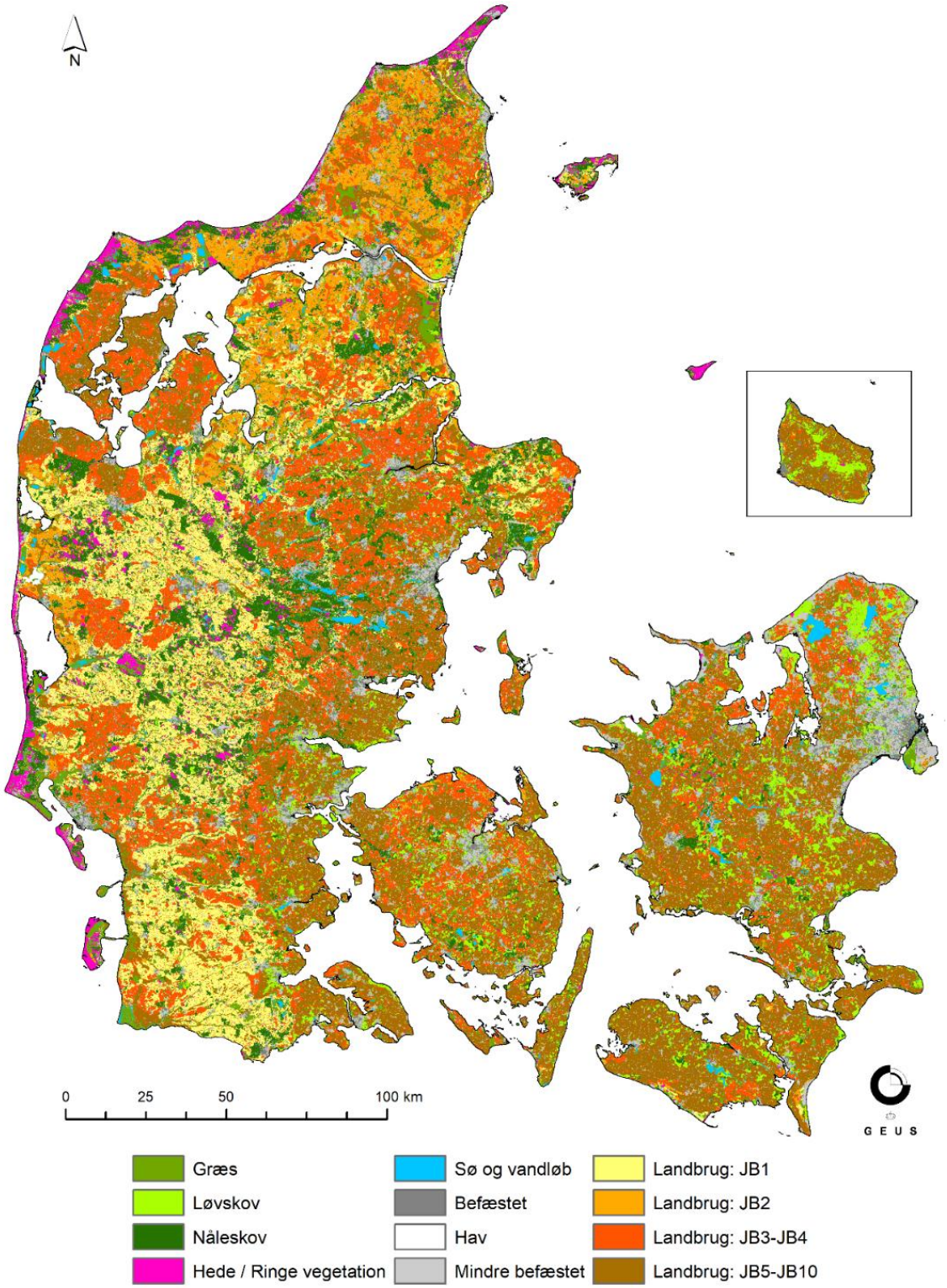
landbrug opdelt i 4 jordbundstype-grupper, baseret på data fra Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug (DCA 2020). Samlet set giver dette 20 kombinationer af afgrøder og jordtyper for landbrugsarealerne. I Tabel 2 ses de kalibrerede rodzone dybder for de 20 afgrøde-jordtype kombinationer anvendt i modellen. Som det fremgår af Tabel 2, antages det at den effektive rodzone dybde, som er den væsentligste model parameter for fordampningsberegningen, for landbrugsafgrøder primært styres af jordtypen, og i mindre grad af afgrødetypen. Indenfor hver kommune er de forskellige afgrødetyper fordelt tilfældigt over de 100m grid som er klassificeret landbrug. Dette skyldes at der ikke er tilgængelig information om den præcise afgrødetype på 100m gridniveau, samt at afgrøderotation ikke repræsenteres i DK-modellen.

Der er efter dataleverancen i HIP4plus fundet en fejl i den fordelingsnøgle af afgrødetyper som er anvendt indenfor hver kommune. Da den overordnede arealanvendelse, Figur 1 er korrekt og da de forskellige afgrøder har meget sammenlignelige rodzone parametre, Tabel 2, har dette en ubetydelig effekt på domæne niveau og model performance. GEUS har gennemført en detaljeret analyse af dette i afsnittet om usikkerhedsvurderinger, 1.4.1. Disse forhold, sammenholdt med den i forvejen randomniserede afgrødefordeling betyder at der må antages en større usikkerhed på vandindhold i rodzonen og de absolutte værdier skal derfor tages med et vist forbehold, da de primært kan sige noget relativt om variationerne mellem tørre og våde år.

Et samlet kort over de 12 arealtypekoder (uden afgrøder) baseret på kombinationer af arealanvendelse og jordtype er illustreret i Figur 1.

Tabel 2: Kalibrerede effektive rodzonedybde (mm) for forskellige afgrøder og jordbundstyper (JB).

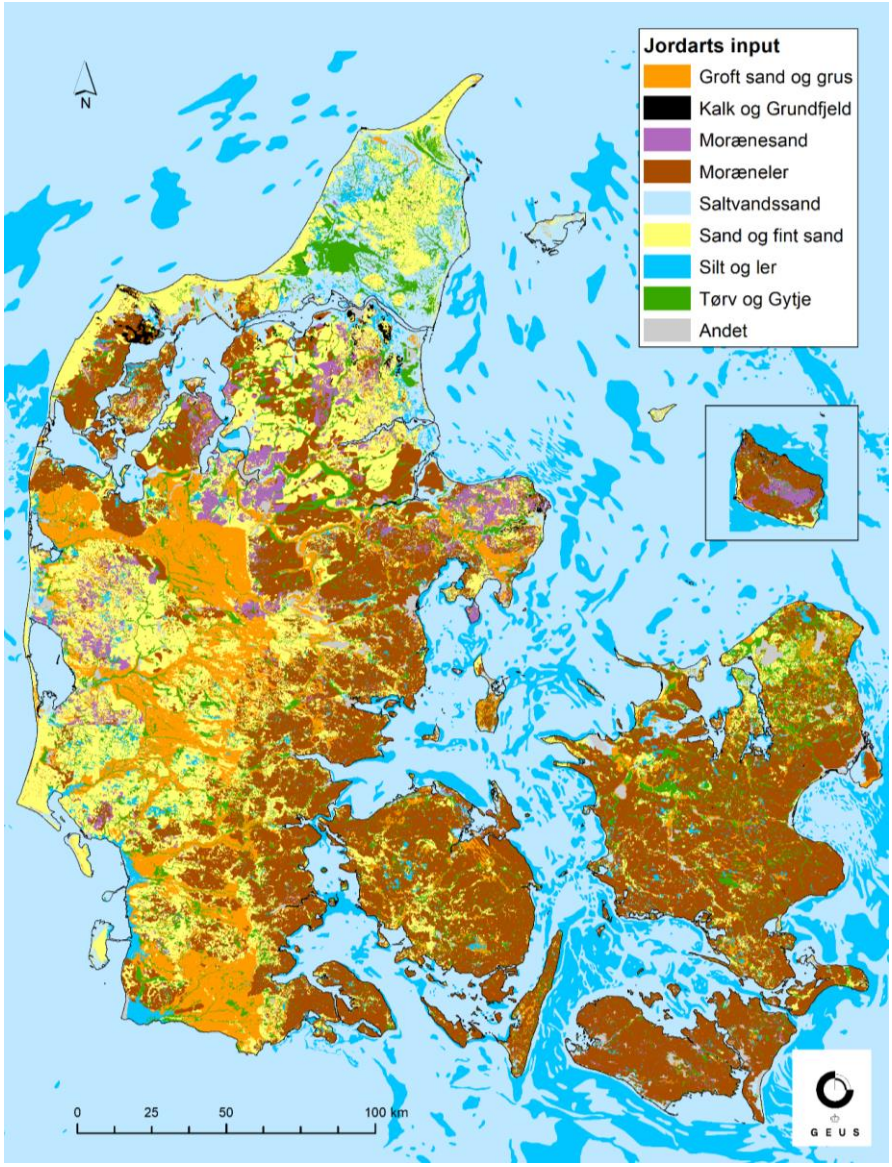
	Vinterafgrøder	Forårsafgrøder	Græs	Majs	Rodfrugter
JB1	779	779	779	779	779
JB2	1170	1030	909	1170	1030
JB3-4	1550	1430	1030	1550	1430
JB5-10	1950	1820	1170	1950	1820



Figur 1: Rummelig fordeling af arealtypekode uden afgrøderr.

1.1.2. Jordarts input

I HIP4Plus er der, i forhold til den tidligere DK-model2019 gruppering af jordarter (*Ler, sand, tørv, kalk og andet*), nu en større differentiering imellem de mere lerede og sandede jordarter, for bedre at kunne repræsentere de regionale variationer i hydrauliske egenskaber. Udvælgelse af de dominerende jordarter er baseret på data fra GEUS jordartskort, målestok 1:25.000 (Jakobsen og Tougaard 2020) hvor muligt, og de resterende områder er bestemt ved GEUS jordartskort, målestok 1:200.000 (Pedersen, et al. 2011/19) (begge kort er tilgængelige under https://frisbee.geus.dk/geuswebshop/index.xhtml). Den primære udvælgelse og gruppering af jordarter er baseret på den arealmæssige udbredelse og jordarter med lille udbredelse er således tilknyttet den jordartsgruppe med sammenlignelige egenskaber. I HIP4Plus er defineret 9 klasser, se Figur 2.

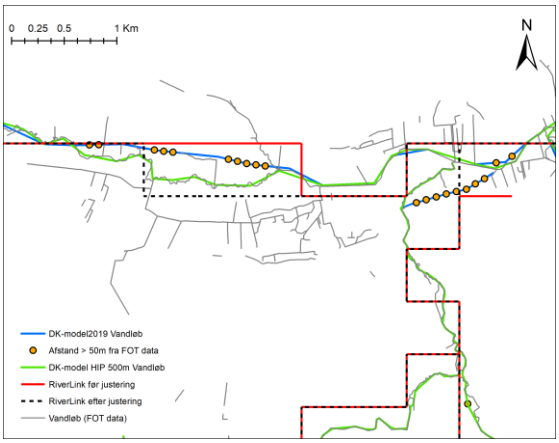


Figur 2: Kortet viser jordarts input til HIP4Plus.

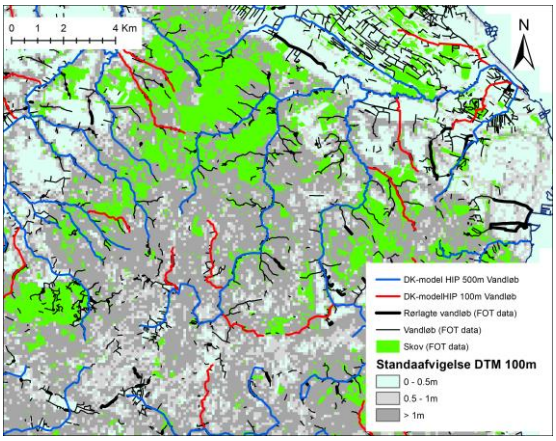
1.1.3. Vandløb og søer

Vandløbsnetværket er justeret og udbygget så det repræsenterer modelopløsningen på 100m. Justering af modelvandløb er udført i to faser, hvor første fase overordnet har handlet om justering af de allerede eksisterende vandløbs placering (vandløbsstup fra DK-model2019) og anden fase har fokuseret på udbygningen af vandløbsnetværket ved inkludering af flere vandløb. Placeringen af eksisterende modelvandløb er justeret i forhold til FOT-data (Geodanmark 2019). I de tilfælde hvor FOT-data har været mangelfuldt justeres vandløbene mod AIS (AIS 2000) og Vandplan-II data (2016). Vandløb med beregningspunkter mere end 50 m fra ovennævnte data er justeret, se eksempel i Figur 3. Justerede modelvandløb er anvendt i DK-model HIP 500m.

Inklusion af flere vandløb til 100m vandløbsnetværket er baseret en række kriterier: En vandløbstilføjelse skal have en længde på minimum 2 km, størstedelen af vandløbet skal gå uden for skov, vandløbet skal kunne identificeres i den topografiske variation og størstedelen af vandløbet må ikke være rørlagt. Udvælgelsen af vandløb er i sidste ende subjektiv og kan derfor afvige fra de opstillede retningslinjer, som er valgt med det formål at inkludere så mange naturlige vandløb som muligt. Mange vandløb som ligger i skovområder er menneskeskabte og består typisk af tætliggende åbne drængrøfter, som i modellen håndteres bedst med dræn komponenten. Det samme gør sig gældende for vandløb eller kanaler som afvander meget flade arealer. Et eksempel på tilføjelse af nye vandløb fra DK6 er vist i Figur 4. Antal vandløb samt længde er præsenteret i Tabel 3 og i Figur 6 fremgår vandløbenes placering, både i 500m og 100m modellen.



Figur 3: Justering af eksisterende modelvandløb, 500m modellerne



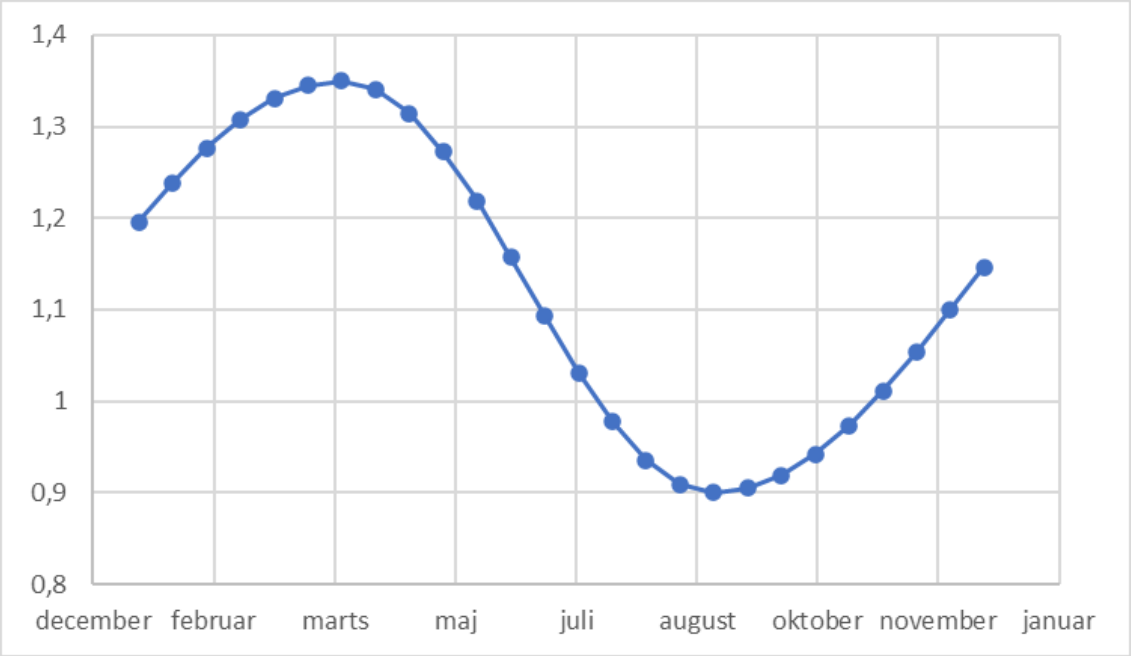
Figur 4: Eksempel på vandløb (rød) som er lagt til 100m modellerne samt vejledende retningslinjer.

For alle de nye vandløbsstrækninger er vandløbstværsnittene beskrevet ved typetværsnit udformet som simple trapezoider hvis størrelse vokser i nedstrøms retning. Placeringen af vandløbene i landskabet tilpasses minimumsværdien i en 10 m højdemodel (DHM, 1,6 m) aggregeret til 100m. Dette er gjort for at sikre vandløbets placering i det topografisk laveste punkt indenfor hver beregningscelle.

Tabel 3: Antal vandløb og længde i 500m og 100m modellerne.

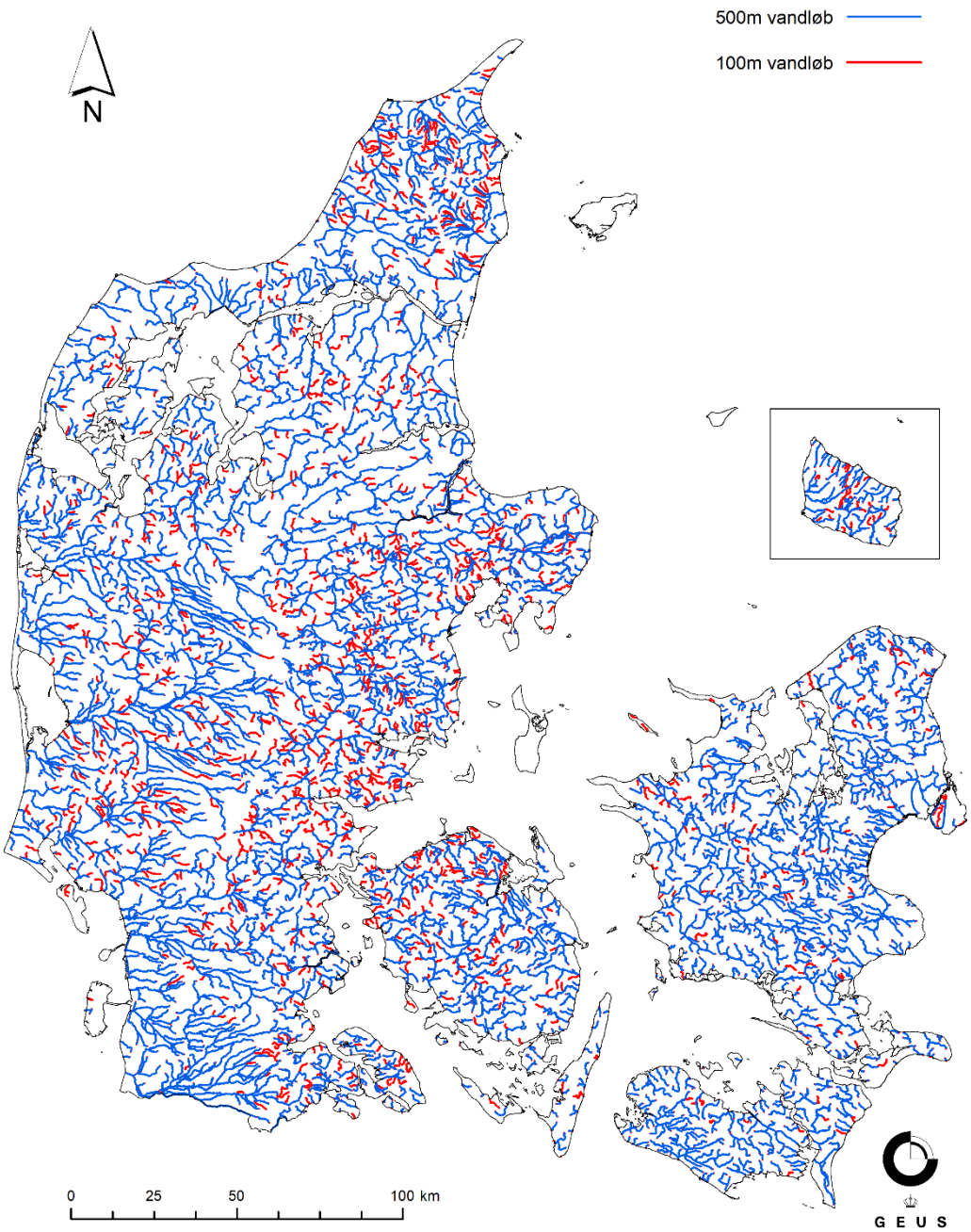
Modelområde	Antal vandløb 100m	Antal vandløb 500m	% flere 100m	Km vandløb 100m	Km vandløb 500m	% længere 100m
DK 1	741	663	12%	3187	2947	8%
DK 2	206	199	4%	859	839	2%
DK 3	382	255	50%	1722	1349	28%
DK 4	539	487	11%	3327	3155	5%
DK 5	1196	778	54%	6020	4738	27%
DK 6	723	489	48%	4047	3311	22%
DK 7	80	54	48%	3376	2668	27%
Hele landet	3867	2925	32%	22538	19007	19%

Vandløbsstrømningen beregnes lige som i DK-model2019, med en forholdsvis simpel løsningsmetode "kinematic routing" med en vandstandsberegning baseret på Manning's formel (DHI A/S 2020, s. 80 ff.). Vandløbs ruhed beskrives dog med et tidsvarierende Manningtal som vist i Figur 5. Denne variation skal afspejle forskelle i vandløbs ruhed, som skyldes væksten af vandplanter og lignende hen over årsforløbet, og er beskrevet i rapporten af metodeudviklingsprojektet (Stisen, Schneider, et al. 2018, s. 67 ff.).



Figur 5: Tidsvarierende faktor til Manningtal M.

Der er ikke inkluderet flere søer i vandløbsdelen af modellen i forhold til DK-model2019. Søerne inkluderes i modellen som brede vandløbstværsnit og en brugerdefineret Q-h relation hvor en fastholdt vandstand er angivet individuelt, svarende til koten over havniveau for den forventede middelvandstand. Vandstanden i søerne varierer derfor ikke med varierende vandføring.



Figur 6: Figuren viser vandløbsnetværkene for 500m modellen (blå), som også er en del af 100m vandløbsnetværket. Undvigelsen af 100m vandløbsnetværket er vist i forhold til det eksisterende 500m netværk (rød).

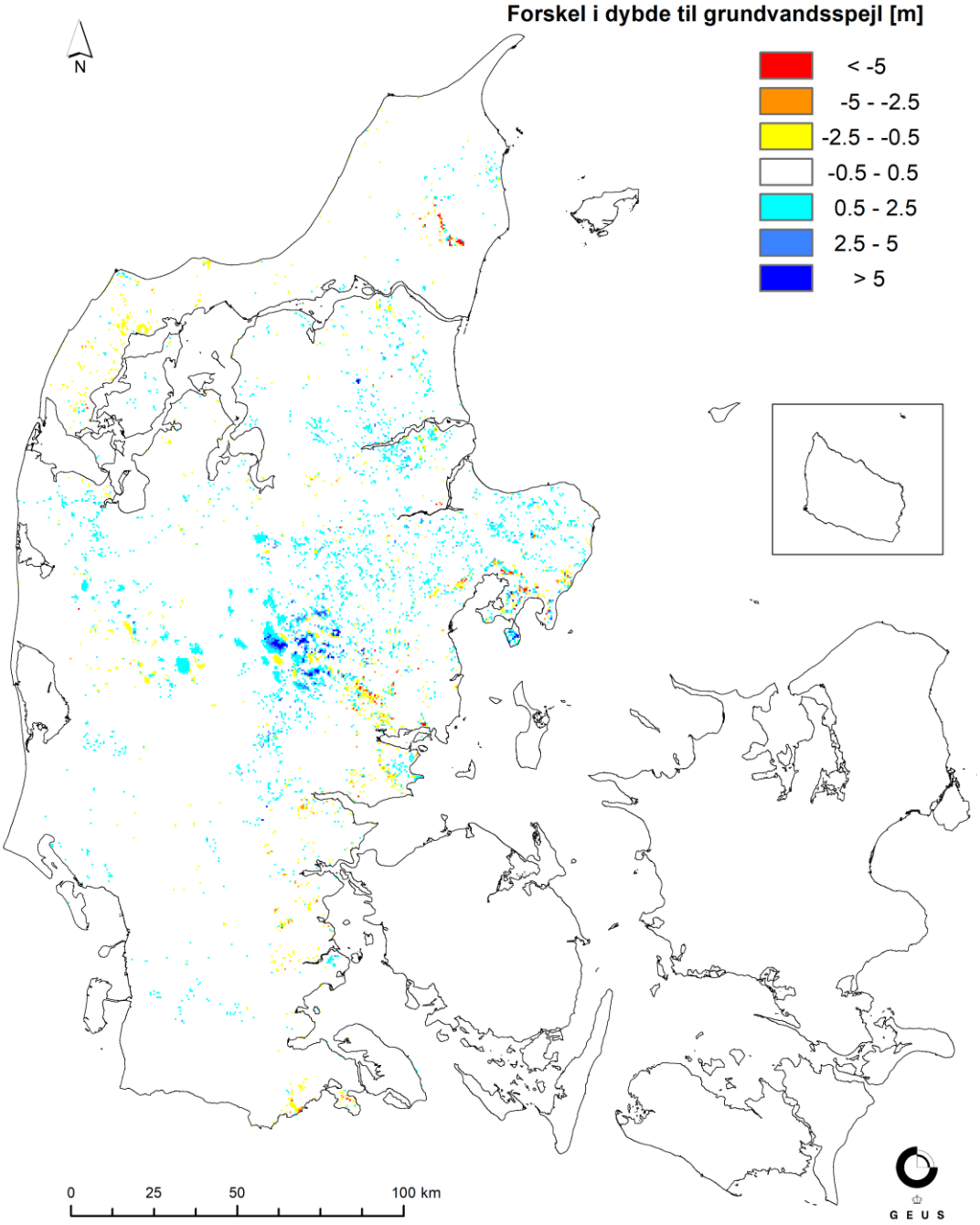
Udvekslingen mellem vandløb og grundvand er styret ved en lækagekoefficient. Vandløbsbundens lækagekoefficient er baseret på den dominerende jordartstype omkring modelvandløbene. Den samlede modstand mellem vandløb og magasinet er afhængig af både lækagen i vandløbet og den omkringliggende geologi, ”Aquifer + Bed” i MIKE HYDRO River. For søerne anvendes en leakage koefficient på 10^{-09} m/s og "river bed only".

1.1.4. Aggregering af geologiske lag / beregningslag

I et forsøg på at mindske beregningstiden for DK-modellen og forbedre udtræk af randbetingelser i Jylland, er antallet af beregningslag for delmodellerne i DK4, DK5 og DK6 reduceret, fra henholdsvis 22 og 18 beregningslag, til 11 for alle tre modeldomæner. I Tabel 4 er vist de 11 nye beregningslag, som stadigvæk er baseret på det Fælles Offentlige Hydrologiske Model (FOHM) (Arvidsen, et al. 2020).

De nye beregningslag er konstrueret således, at de øvre hydrostratigrafiske enheder med stor udbredelse, så vidt muligt, er repræsenteret selvstændige i beregningslag. Dybere hydrostratigrafiske enheder er, så vidt muligt, samlet i beregningslag. De øverste hydrostratigrafiske enheder KL1, KS1, KL2 og KS2 er samlet i beregningslag nr. 2 grundet deres ringe udbredelse.

Der er foretaget en sammenligning af performance på vandføring og dybden til grundvandsspejlet imellem DK-model2019 med de tidligere beregningslag (22 til 18 lag) i forhold til den nye inddeling af beregningslag (11 lag). Da resultaterne ikke udviste større afvigelse i den estimerede dybde til grundvandsspejlet og vandførings performance vurderes aggregeringen af de geologiske lag at være acceptabel. I Figur 7 vises forskellen på dybden til grundvandsspejlet med færre beregningslag.



Figur 7: Illustrering af forskellen i dybden til grundvandsspejlet i Jylland ved sammenlægning af beregningslag.

Tabel 4: Oversigt over de hydrostratigrafiske- og beregningslag samt FOHM (fælles offentlig hydrogeologisk model) flader for Jylland.

Gamle lag DK5 DK6	Gamle lag DK4	Nye lag DK4, DK5, DK6	Navn	Topflade	Bundflade	Bemærkninger (FOHM-enheds beskrivelse)	FOHM bundflade
1		1	TOP2m	*dkjm_Topo*	*dkjm_top2m*	Det øverstes toplag er: Moræneler, Ler, Silt og ler, Sand og fint sand, Smeltevandssand, groft sand og grus, tørv og gytje, kalk og grundfjeld, By, hav og andet.	
2		2	KL1	*dkjm_top2m*	*dkjm_ks1t*	**Top tørv** (terrænnært)	100_Postglacial_toerv_Bund
3			KS1	*dkjm_ks1t*	*dkjm_ks1b*	**S1_sand** (terrænnært)	200_Kvartaer_sand_Bund
			KL2	*dkjm_ks1b*	*dkjm_ks2t*	**L1_ler** (terrænnært)	300_Kvartaer_ler_Bund
			KS2	*dkjm_ks2t*	*dkjm_ks2b*	**S2_sand** (terrænnært)	400_Kvartaer_sand_Bund
4		3	KL3	*dkjm_ks2b*	*dkjm_ks3t*	**L2_ler** (plateau/terrænnært)	1100_Kvartaer_ler_Bund
5		4	KS3	*dkjm_ks3t*	*dkjm_ks3b*	**S3_sand** (plateau)	1200_Kvartaer_sand_Bund
6		5	KL4	*dkjm_ks3b*	*dkjm_ks4t*	**L3_ler** (plateau)	1300_Kvartaer_ler_Bund
7		6	KS4	*dkjm_ks4t*	*dkjm_ks4b*	**S4_sand** (plateau)	1400_Kvartaer_sand_Bund
8		7	KL5	*dkjm_ks4b*	*dkjm_ks5t*	**L4_ler** (plateau/dale)	1500_Kvartaer_ler_Bund
9		8	KS5	*dkjm_ks5t*	*dkjm_ks5b*	**S5_sand** (dale)	2100_Kvartaer_sand_Bund
			KL6	*dkjm_ks5b*	*dkjm_ks6t*	**L5-ler** (dale)	2200_Kvartaer_ler_Bund
			KS6	*dkjm_ks6t*	*dkjm_ks6b*	**S6_sand** (dale)	2300_Kvartaer_sand_Bund
10			KL7	*dkjm_ks6b*	*dkjm_preq*	**L6_ler** (dale)	2400_Kvartaer_ler_Bund
			PL1	*dkjm_preq*	*dkjm_ps1t*	**Mådegruppen**	5100_Mådegrup-pen_Gram_og_Hodde_Bund
11			PS1	*dkjm_ps1t*	*dkjm_ps1b*	**Odderup Fm.** (ODS3/ODS2)	5400_Nedre_Odderup_ODS2_Bund
12	12	9	PL2	*dkjm_ps1b*	*dkjm_ps2t*	**Arnum Fm.** (ARL2)	5400_Nedre_Ar-num_ARL2_Bund
13		10	PS2	*dkjm_ps2t*	*dkjm_ps2b*	**Bastrup Fm.** (BADS6/BADS5)	5800_Bastrup_BADS5_Bund
14			PL3	*dkjm_ps2b*	*dkjm_ps3t*	**Klintinghoved Fm.** (KRL5)	5900_Klintingho-ved_KRL5_Bund
15	13		PS3	*dkjm_ps3t*	*dkjm_ps3b*	**Bastrup Fm.** (BADS4)	6000_Bastrup_BADS4_Bund
16	14		PL4	*dkjm_ps3b*	*dkjm_ps4t*	**Klintinghoved Fm.** (KRL4)	6100_Klintingho-ved_KRL4_Bund
17	15		PS4	*dkjm_ps4t*	*dkjm_ps4b*	**Bastrup Fm.** (BADS1/BADS2/BADS3)	6600_Bastrup_BADS1_Bund
18	16		PL5	*dkjm_ps4b*	*dkjm_ps5t*	**Klintinghoved Fm.** (KRL1) **Vejle Fjord Fm.** (VFL9/ VFL8/ VFL7/ VFL5)	6700_Klintingho-ved_KRL1_Vejle_Fjord_Bund
19			PS5	*dkjm_ps5t*	*dkjm_ps5b*	**Billund Fm.** (BDS6/BDS9)	6800_Bil-lund_BDS6_BDS9_Bund
20			PL6	*dkjm_ps5b*	*dkjm_ps6t*	**Vejle Fjord Fm.** (VFL6)	6900_Vejle_Fjord_VFL6_Bund
21	17		PS6	*dkjm_ps6t*	*dkjm_ps6b*	**Billund Fm.** (BDS5/ BDS4/ BDS3/ BDS2/ BDS1/ BDS0)	7800_Billund_BDS0_Bund
22	18	11	PL7	*dkjm_ps6b*	*dkjm_pa1b*	**Vejle Fjord Fm.** (VFL0) **Brejning ler** **Palaeogent ler**	8000_Palaeogent_ler_Bund
			Kalk	*dkjm_pa1b*	*dkjm_dk1b*	**Kalk**	8500_Danien_Kalk_Bund
			Kalk	*dkjm_dk1b*	*dkjm_sk1b*	**Skrivekridt**	9000_Skrivekridt_Bund

1.1.5. Indvindinger og markvanding

Indvindingen i modellerne er baseret på udtræk fra Jupiterdatabasen i maj 2020. I Figur 8 vises placeringen af indvindingsboringerne med middelindvindingen på anlægsniveau i perioden 1990 – 2019.

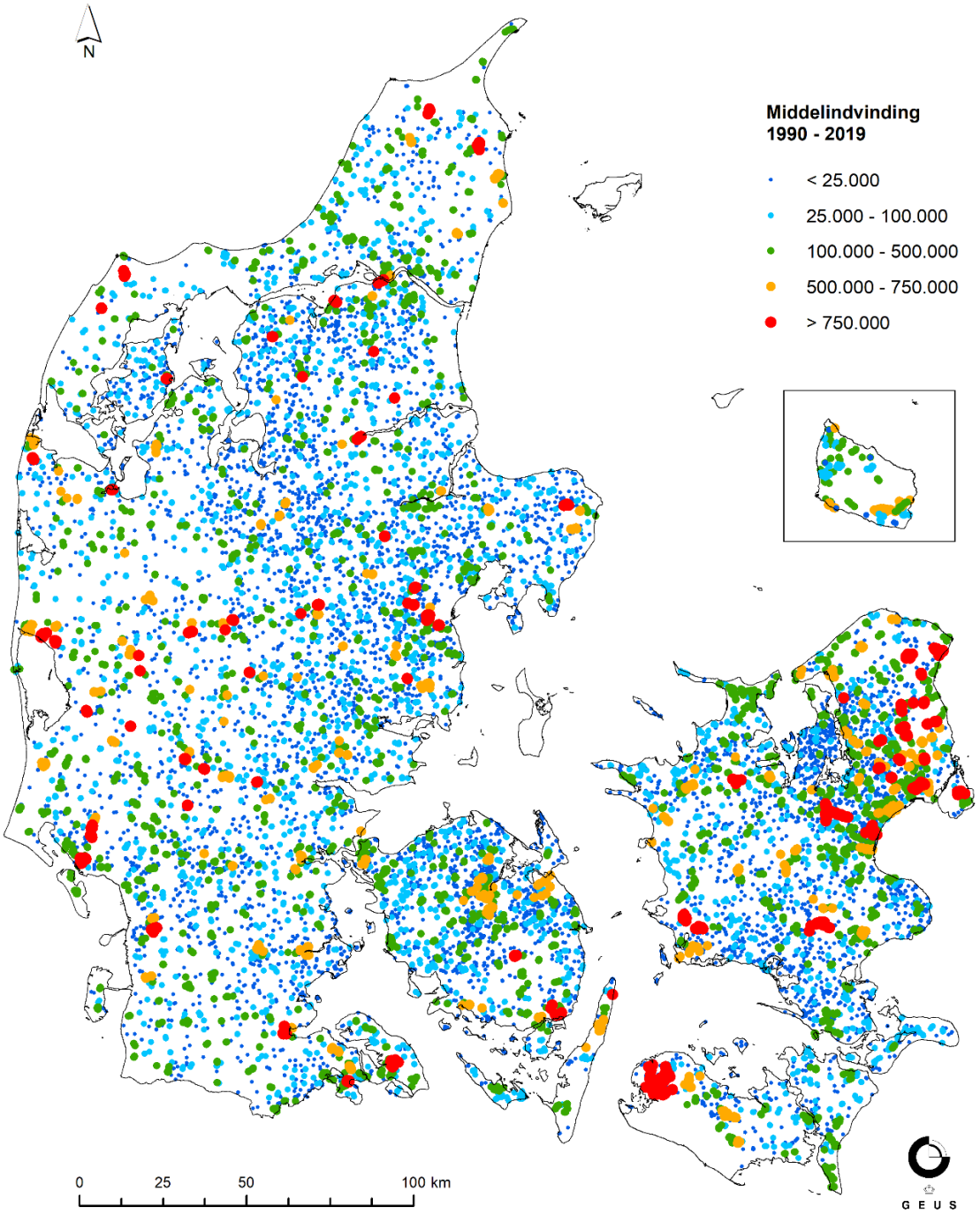
Til modelinput justeres indvindingsfilterne til 100m, respektive 500m modellernes vandførende beregningslag. Justeringerne er udført i programmet WellViewer (Hydroinform IT 2017) og filterne flyttet op eller ned (maksimalt 15m) til et vandførende magasin defineret som minimum 3 m tykt. Disse justeringskriterier betyder at nogle filtre stadig er placeret i et, i modellen ikke vandførende lag. Opgørelse med indvindingsmængde per modelområde samt andel boringer som løber tør i 100m modelsimuleringerne, fremgår i Tabel 5.

Markvandingsarealerne er opgjort ved en vandingszone omkring boringerne på baggrund af vandingsvolumen og arealanvendelsen. Som følge af varierende grid-opløsning i DK-model HIP 500m og 100m modellerne, er zonernes størrelse tilpasset modellerne. I 500m modellen er zonernes radius 450 m (samme som DK-model2019). I 100m modellen er zonernes radius 550m.

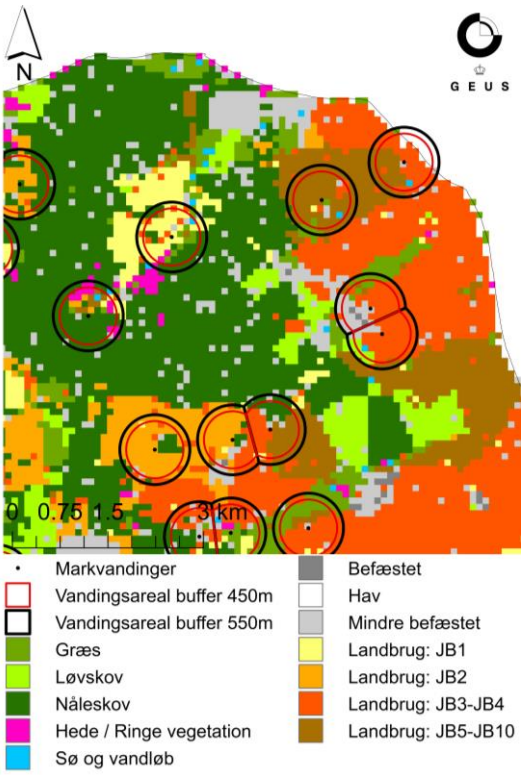
Ændringerne sker som følge af den stigende detaljeringsgrad af arealanvendelseskortet. Den stigende opløsning medfører at større dele af bufferen ikke længere er markareal og derfor ikke skal vandes. Dermed er vandingsarealet mindre, hvilket resulterer i at vandingsvolumen bliver for lav. Derfor udvides vandingszonernes radius med 100m for at bibeholde det simulerede vandingsvolumen. Vandingszonerne for 500m og 100m modellen er visualiseret på Figur 9. Fordelingen af markvandingsboringer ses på Figur 10.

Tabel 5 Specificeret og anvendt indvinding i 100m modellerne. Angiven markvanding er anvendt mængde.

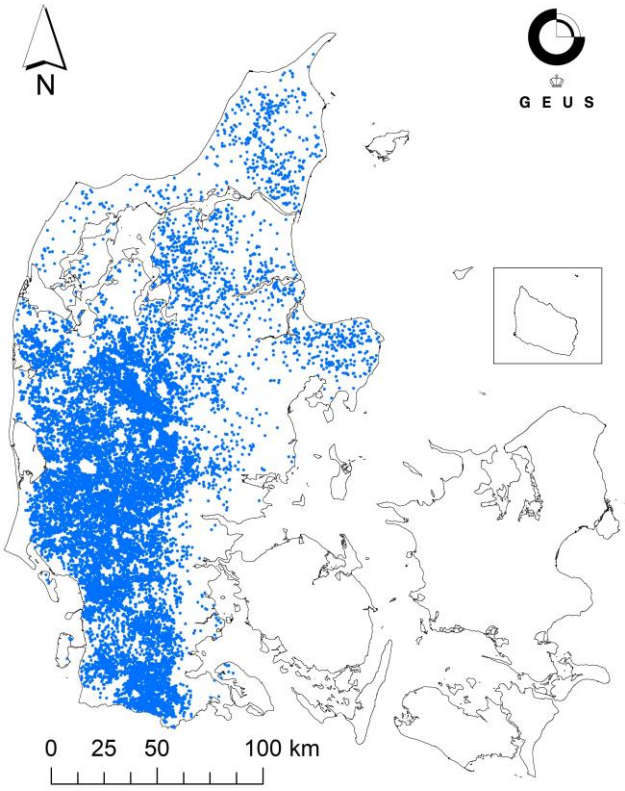
Modeldomæne	Specificeret [m³/år]	Anvendt [m³/år]	Procent	Markvanding [m³/år]
DK1	166,900,116	160,809,637	96.4%	
DK2	10,517,483	10,127,947	96.3%	
DK3	42,571,017	38,689,623	90.9%	
DK4	77,048,842	73,041,062	94.8%	63,013,284
DK5	107,029,285	105,285,797	98.4%	78,720,905
DK6	87,839,463	85,486,246	97.3%	20,264,484
DK7	7,682,921	6,719,709	87.5%	



Figur 8: Middel indvinding i m³/år for perioden 1990 – 2019 angivet på anlægsniveau. Markvanding i Jylland undtaget.



Figur 9: Udvidelsen af markvandingsarealet fra 450m radius buffer omkring vandingsboringen til 550m radius. I baggrunden ses den det nye arealanvendelseskort i 100m nye opløsning.



Figur 10: Vandingsarealerne for hele Danmark. Det fremgår af figuren at der kun medtages vandingsarealer i Jylland.

1.1.6. Numeriske parametre

Dataoutput i MIKE SHE bliver gemt i kategorier med samme tidskridt. Simuleringsresultater for vandløb, overfladisk afstrømning (overland flow) og den umættede zone (unsataurated zone) er gemt for hver 24 timer, mens det hydrauliske trykniveau i den mættede zone (saturated zone) er gemt hver 15 dag (360 timer) og de hydrauliske fluxes er gemt for hver 90 dage (2160 timer).

Dataoutputtet fra modellerne er meget store, og størrelsen af output filer ønskes begrænset så meget som muligt. MIKE SHE kan kun angive ét lagrings-interval per kategori (overland flow, umættet zone m.m, trykniveau i mættet zone og flux i mættet zone). Der er derfor blevet udarbejdet et python-script, der gør det muligt at gemme griddata (f. eks "depth to phreatic") med et finere tidsstridt (dvs. daglige værdier), end indskrevet i udtræk for mættet zone med MIKE SHE.

Anvendte numeriske parametre i DK-model HIP 500m og 100m er listet i Tabel 6. For en uddybende forklaring henvises til DHI A/S 2020, s. 186 ff.

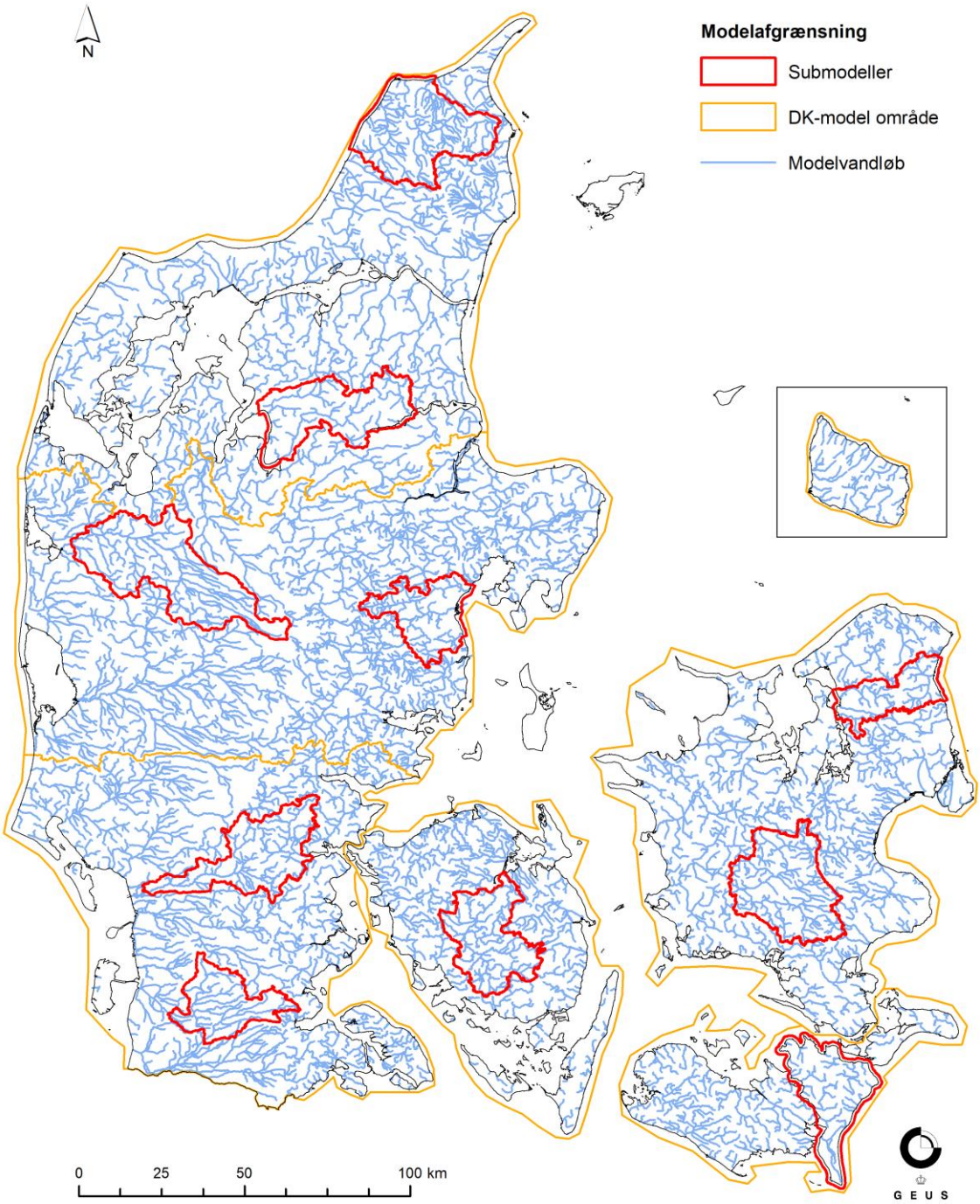
Tabel 6: I tabellen vises numeriske parametre af DK-model HIP 500m og 100m.

DK-model HIP 500m		DK-model HIP 100m	
Overland flow		Overland flow	
Løsningsalgoritme	PCG	Løsningsalgoritme	Explicit
Maks. tidsskridt	24 timer	Maks. tidsskridt	24 timer
Iterationskontrol:		***Iterationskontrol:***	
Maks. H-ændring pr. iteration	1,0e-4 m	Maks. courant nummer	0,8
Maks. residual fejl	1,0e-4 m/d		
Maks. iterationer	200		
Umættet zone		Umættet zone	
Maks. tidsskridt	24 timer	Maks. tidsskridt	24 timer
Iterationskontrol:		***Iterationskontrol:***	
Maks. profil vandbalancefejl	1,0e-3 m	Maks. profil vandbalancefejl	0.001
Mættede zone		Mættede zone	
Løsningsalgoritme	PCG	Løsningsalgoritme	PCG
Maks. tidsskridt	24 timer	Maks. tidsskridt	24 timer
Iterationskontrol:		***Iterationskontrol:***	
Maks. H-ændring	0,01-0,1 m	Maks. H-ændring	0,01-0,1 m
Maks. residual fejl	0,01-0,05 m/d	Maks. residual fejl	0,01-0,05 m/d
Maks. iterationer	70	Maks. iterationer	50-70
Nedbørsafhængig tidsskridt kontrol		Nedbørsafhængig tidsskridt kontrol	
Maks. nedbør pr. tidsskridt	100 mm	Maks. nedbør pr. tidsskridt	100 mm
Maks infiltration pr. tidsskridt	100 mm	Maks infiltration pr. tidsskridt	100 mm
Nedbørs rate der kræver eget tidsskridt	4 mm/time	Nedbørs rate der kræver eget tidsskridt	4 mm/time

1.1.7. Udvælgelse og modelopsætning af submodeller (100m)

I forbindelse med kalibrering af DK-model HIP 100m, samt til træning af maskinlærings-algoritmen til nedskalering af klimafremskrivninger, er der behov for at kunne arbejde med et mindre, repræsentativt, udsnit af modellen. Dette er nødvendigt fordi de numeriske beregninger i den nationale 100m model er for tidskrævende til at lave tests og gennemføre en invers kalibrering på. Derfor arbejdes der i HIP4Plus med 10 submodeller. I det nedenstående beskrives forskellene på den nationale DK-model HIP 500m opsætning og DK-model HIP submodellerne i 100m opsætning.

Udvælgelsen af de 10 submodeller, Figur 11, er baseret på en lang række kvalitative kriterier. Dels ønskes der bedst mulig repræsentation af forskellig topografi, arealanvendelse, jordart, kalk i undergrunden, dybde til grundvandet og afdræningsforhold. Desuden ønskes der submodeller som indeholder så meget kalibreringsdata som muligt, f.eks. mange vandføringsstationer, samt submodeller med veldefinerede randbetingelser. Afgrænsningen af submodellerne er valgt ud fra grænserne i ID15 oplandene, hvilket giver gode topografiske randbetingelser.



Figur 11: Oversigt af geografisk placering af submodeller og DK-modelområder.

Til beregning af randbetingelserne til submodellerne anvendes 500m modellens simuleringer. Havet og fjorde er delvist benyttet som ydre randbetingelse i de submodelområder. DK6 Nord og Syd, DK5 Øst, DK3, DK2 og DK1 Nord, som grænser op til hav og fjord, har fået tillagt en bufferzone ud i havet eller fjorden på ca. 1km. Derudover er randbetingelser i submodellerne beskrevet ved "Zero Flux" i alle lerlag, samt i de øverste lag ned til det første sandmagasin (som i DK1 – DK3 er KS1 og for de

Jyske submodeller KS3). I alle dybere sand- og kalklag er randen beskrevet med en tidsvarierende ydre randbetingelse fra den kalibrerede 500m model. Alle submodeller er ligesom de andre nationale 100m modeller opstillet med en horisontal diskretisering på 100 x 100m. Som initiale startværdier for det simulerede trykniveau er det anvendt en middelværdi for perioden 2005 – 2010 fra den kalibrerede DK-model HIP 500m model i hvert beregningslag.

De 10 submodeller dækker tilsammen et landareal på 6,663 km^2, der er fordelt på delområderne som angivet i Tabel 7. Hele DK-modellen dækker Danmark og et landareal på ca. 42,700 km^2 (undtagen Bornholm). Submodellerne udgør samlet ca. 16% af hele DK-modellen (undtagen Bornholm).

Tabel 7: Areal for de 10 submodeller og hele DK-model HIP.

Submodeller	Samlet areal [km²] Submodel	Samlet areal [km²] DK-modeldomæne	%-andel submodel af DK-modeldomæne
DK1_sub_NORD	369	7195	17%
DK1_sub_SYD	820		
DK2_sub	514	2036	25%
DK3_sub	623	3484	18%
DK4_sub_ NORD	704	7902	15%
DK4_sub_ SYD	476		
DK5_sub_ØST	472	11551	14%
DK5_sub_VEST	1097		
DK6_sub_ NORD	861	9943	16%
DK6_sub_ SYD	727		
Total	6663	42700	16 %

1.2. Kalibrering, validering og performance

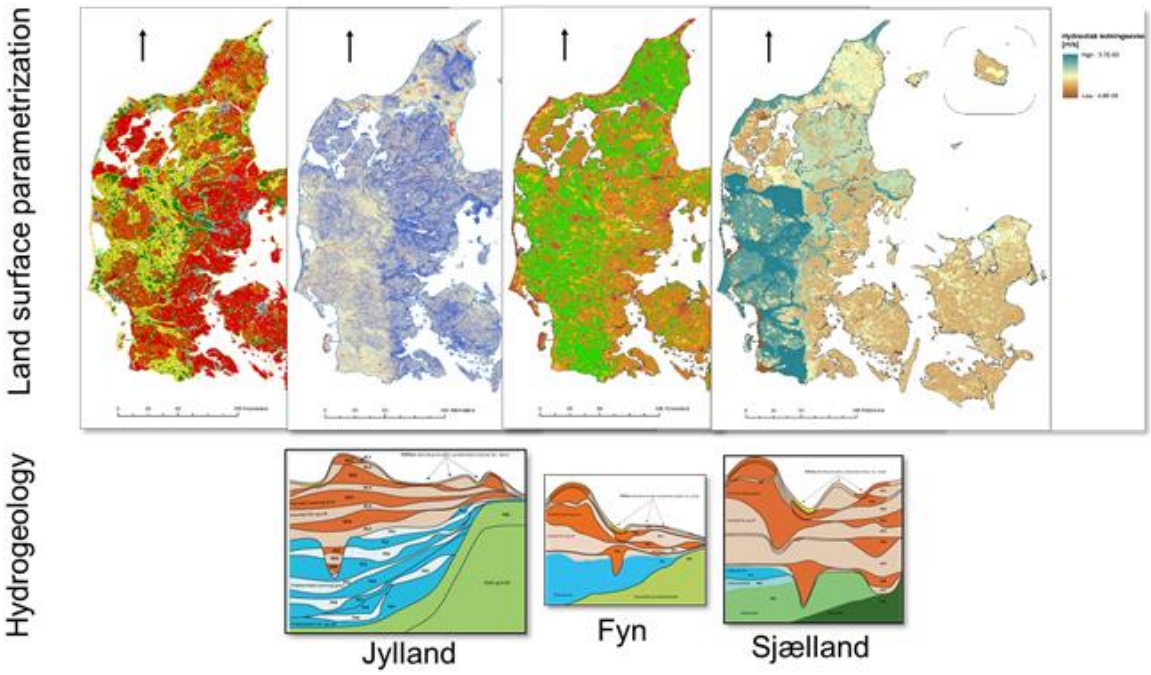
I følgende afsnit beskrives kalibrering- og valideringskoncept for 500m og 100m modellerne samt parametriseringskoncept for 100m modellerne. Her beskrives også databehandling for pejle-, sø- og vandføringsdata. Til sidst præsenteres kalibreringsmål, nøjagtighedskriterier og nøjagtighedsmål.

1.2.1. Kalibreringskoncept DK-model HIP 500m

Kalibreringskonceptet for de 6 delmodeller i 500m opløsning er identisk med konceptet fra DK-model 2019 (Stisen, Ondracek, et al. 2019), hvor delmodellerne DK1 – DK6 kalibreres samlet med ét fælles parametersæt. De dybereliggende parametre for de geologiske enheder kalibreres særskilt for Jyllandsmodellerne (DK4-6), Fynmodellen (DK3) og Sjælland og øerne modellerne (DK1 og DK2) for at honorere en varierende geologi. De terrænnære parametre er kalibreret med landsdækkende para-

metre, for jordtyper, vegetation, lækage og dræn, for at sikre en mere robust og konsistent parametrisering af de overfladenære hydrologiske processer. Denne fremgangsmåde, som er skitseret i Figur 12, sikrer at individuelle hydrogeologiske parametre kan optimeres for det dybe grundvand, mens en rumlig konsistent parametrisering af de terrænnære parametre sikrer rumligt konsistente simuleringer af fordampning, drænafstrømning, nettonedbør, grundvandsdannelse, terrænnær grundvandsstand osv. Detaljerne omkring kalibrering i HIP4Plus er beskrevet i de følgende afsnit.

DK7 er kalibreret som én isoleret model i 100m opløsning, på grund af den væsentligt anderledes geologi.



Figur 12: Kalibrerings-koncept som sikrer rumlig konsistent parametrisering (fra venstre: Arealanvendelse, dræn parametre, Ks i jordart) relateret til overfladenære og dybe hydrologi i Danmark.

1.2.2. Parametriserings- og kalibreringskoncept DK-model HIP 100m

Projektet har bl.a. til formål at producere en landsdækkende hydrologisk model i 100m gridopløsning. Der er dog skitseret en plan for kalibrering og parametrisering i HIP4Plus, som udelukkende inkluderer en fuld national skala kalibrering af DK-model HIP i 500m gridopløsning. Dette skyldes, at den estimerede beregningstid for en fuld national skala 100m modelkørsel kræver ca. 5-600 timer sekventielt afviklet og ca. 125-150 timer med parallelt afviklede delmodeller for blot én enkelt 30 års forward kørsel. Det er ikke gennemførligt indenfor rammerne af HIP4Plus at foretage en fuld kalibrering med et sådant modelsystem. For at overkomme ovenstående udfordring er idéen at parametriseringen af den nye 100m DK-model kan tilvejebringes ved en kombination af parameteroverførsel fra en kalibreret 500m model, og evt. efterfølgende justering af få udvalgte parametre, der vurderes at være gridskala-afhængige og af særlig vigtighed i forhold til HIP4Plus leverancer.

Mini-review 1 i HIP4Plus omhandlede en fremgangsmåde til parametrisering af 100m modellen som primært baseres på parameterværdier fra 500m kalibreringen. Ud fra en teoretisk vinkel, sammenholdt med resultater af de test som blev udført til minireview-1, vurderes det, at parametre forbundet med den dybere geologi har begrænset skalaafhængighed, mens parametre knyttet til den øvre hydrologi umiddelbart vurderes mere skalaafhængige i forhold til projektets leverancer. Som et resultat af mini-review 1 blev det besluttet at gennemføre en enkelt modelkørsel for hele DK domænet i 100m med fuld parameteroverførsel fra den færdigkalibrerede 500m model. Herefter vurderes performance af denne model i sammenligning med 500m modellen og opstillede mål. På denne baggrund er der foretaget en vurdering af hvilke parametre, som med fordel kan justeres til 100m grid opløsning. Disse parametre er: Hydrauliske ledningsevner (Ks) i øverste beregningslag, samt det øverste kvartære sand og ler-lag (KS1 og KL1) for hver region, roddybde, dræn- og vandløbslækage parametre samt detention storage og manningtal for overland flow.

Selv med et begrænset antal frie kalibrerings parametre (12), er det ikke muligt at foretage en fuld national kalibrering i 100m. Derfor gennemføres i stedet 100m kalibreringen af de udvalgte parametre som en submodel kalibrering baseret på 10 udvalgte submodeller, Figur 11. Disse submodeller dækker ca. 1/6 af landet og er repræsentative for variationer i geologi, topografi, drænforhold, klima, osv.

Konceptet med submodel kalibrering muliggøres af den rumligt konsistente parametriseringsmetodik beskrevet i afsnit 1.2.1, hvor de overfladenære parametre er bestemt efter rumligt konsistente principper baseret på nationale kortdata. Dette betyder at en given parameter ikke kalibreres specifikt til et givent opland. Istedet kalibreres den bedste parametrisering på tværs af 10 submodeller, med et givent koncept. Dette vil øge robustheden i parameter overførsel til nabo oplande på bekostning af optimal performance lokalt (den enkelte submodel), samt for oplande der ikke er beliggende indenfor de 10 submodel oplande.

100m submodel kalibreringen er gennemført af to omgange, dels med 5 parametre og med alle 12 parametre for at vurdere betydningen af om den terrænnære geologi inkluderes. Disse to submodelkalibreringer er opstillet efter præcist samme principper og med samme observationsdata og objektivfunktioner som 500m kalibreringen (dog naturligvis kun kalibreret mod de observationer som ligger indenfor de 10 submodelområder). Submodelkalibreringen med 5 parametre (roddybde, lækage, to dræntidskonstanter og 'detention storage') resulterede i meget små ændringer i parameterværdier og minimal ændring i model performance nationalt. Der er derfor ikke foretaget yderligere analyser af submodelkalibreringen med 5 parametre. Submodel kalibreringen med 12 parametre viste en vis forbedring på objektivfunktionen, særligt for vandføring under kalibrering, og ligeledes ved den efterfølgende parameteroverførsel til den nationale 100m model.

Alle evalueringer og resultater fra 100m kalibreringen er i det efterfølgende for den nationale 100m model, efter parametrisering baseret på 100m submodelkalibreringen med 12 kalibreringsparametre.

1.2.3. Valideringskoncept DK-model HIP 500m/100m

Til validering af modellerne er der anvendt en split-sampling test, hvor modellerne er kalibreret over en 11-årig periode fra d. 01-01-2000 til d. 31-12-2010, og valideret for perioderne fra d. 01-01-1990 til d. 31-12-1999 og fra d. 01-01-2011 til d. 31-12-2019 (I det følgende benævnes de to valideringsperioder 1990-1999 og 2011-2019 som henholdsvis, valideringsperiode 1 og valideringsperiode 2). Inddragelse af valideringsperiode 1 skyldes et væsentligt stærkere datagrundlag i forhold til klimadata og en forventet større usikkerhed for valideringsperiode 2, grundet en vurderet underestimering af nedbøren i DMIs klimagrid. Bornholm er særskilt kalibreret over en 7-årig periode fra d. 01-2000-2006 grundet førnævnte underestimering af nedbøren, som for Bornholm allerede fra 2007 resultere i større uoverensstemmelser med den observerede afstrømning. Valideringsmål og kriterier er beskrevet mere detaljeret i det følgende.

1.2.4. Valg og bearbejdning af kalibreringsdata

Modellerne er kalibreret mod pejledata, vandstand i søer og vandføringsdata. Pejledata er udtrukket fra JUPITER databasen og består af enkelmålinger, serier med få observationer og hele tidsserier med regelmæssige observationer. En del af de regelmæssige og længerevarende pejletidsserier er udover den overordnede kalibrering af at trykniveauer også anvendt i kalibreringen målrettet simulering af den årlige amplitude i trykniveauerne. Vandstandsdata fra søer er udtrukket fra en digital højdemodel og vandføringsdata er indhentet fra fagdatacenter for ferskvand, Bioscience, Aarhus Universitet.

1.2.5. Databehandling af pejledata

Pejledata er udtrukket fra JUPITER databasen *(https://www.geus.dk/produkter-ydelser-og-faciliteter/data-og-kort/national-boringsdatabase-jupiter/)*. Pejledata består af enkelmålinger, serier med få observationer og hele tidsserier med regelmæssige observationer. I modellen er kun medtaget pejledata angivet i databasen som værende foretaget under “ro” da modellen er dårligt til at simulere sænkning i magasin samt filtertab, angivet under “drift”. Selvom forholdene under måling for en stor del af observationerne i JUPITER databasen er ukendte, er disse målinger også medtaget i modellerne. I Tabel 8 vises fordelingen af indtag for den historiske periode efter indplacering i beregningslag. En yderligere beskrivelse af den overordnede procedure for indplacering af pejledata i modellernes beregningslag kan findes i (Stisen, Ondracek, et al. 2019).

Tabel 8: Fordeling af indtag pr. beregningslag fordelt på delområder.

Beregningslag	DK1	DK2	DK3	DK4	DK5	DK6	DK7
1	621	31	311	436	690	432	24
2	4021	474	3746	2591	2046	5448	142
3	2320	163	1849	1760	3419	2138	203
4	6327	481	2683	4907	5001	4242	123
5	6695	127	3360	907	1130	1266	159
6	1953	160	548	4719	7083	2853	105
7	2387	273	620	439	829	353	41
8	762	91	144	2266	4681	514	
9	984	17	491	37	147	54	
10	972	10		607	1981	245	
11	10624	1012		57	1168	3383	
I alt	37666	2839	13752	18726	28175	20928	797

Efter indplacering af indtag i modellen er der foretaget en filtrering af pejledata anvendt i modellen i perioden 1990 – 2019. Kvalitetssikring foregik i seks trin som beskrevet efterfølgende, separat for hver af de tre kalibrerings- og valideringsperioder 1990 – 1999, 2000 – 2010 og 2011 – 2019. Tabel 9 giver et overblik over antal af filtrerede observationer og indtag for data fra kalibreringsperioden 2000 – 2010.

Tabel 9: Overblik over kvalitetssikringen af pejledata fra kalibreringsperioden år 2000-2010. Tabellen viser de 6 trin er der angivet pct. observationer og indtag fjernet i de enkelte trin, samt antal observationer og indtag efter kvalitetssikringen.

Trin	Kriterium	Procent observationer/indtag fjernet	Antal observationer/indtag efter udtydning
1. Fejlmålinger	afvigelser mere end 40 m fjernes.	4,5 / 0,1	744.528 / 41.146
2. Indvindingspåvirket	afstand mindre end 250 m fra indvindinger over 50.000 m^3/år og med afvigelser mere end 10 m fjernes.	1,5 / 2,1	733.053/ 40.294
3. Manuel (tidsserier)	mindst 1 observation pr. måned i mindst ét år.	1,2 / 0,03	724.477 / 40.283
4. RF classifier	> 19 observationer pr. boring.	2,8 / 0,1	704.208 / 40.261
5. Median filter	Mellem 3 og 19 observationer pr. boring.	1,7 / 0,01	692.514 / 40.256
6. Difference	2 observationer pr. boring.	3,6 / 0,4	667.568 / 40.103

Trin 1, Fejlmålinger: Alle observationer med en afvigelse på mere end 40 m fra modelkørslen anses som usandsynlige og er frasorteret.

Trin 2, Indvindingspåvirket: Alle observationer med en afstand af mindre end 250 m fra en indvindingsboring på minimum 50.000 m^3/år er fjernet, hvis afvigelsen fra modelkørslen er mere end 10 m. Disse boringer kan ikke anvendes til modelevalueringen grundet de er vurderet stærkt indvindings-

påvirkede. Usikkerheden ligger i den tidslige fordeling af indvindingsmængden, som kun er tilgængelige i årlige værdier og den rumlige effekt af sænkningstragten som er begrænset af modelopløsningen.

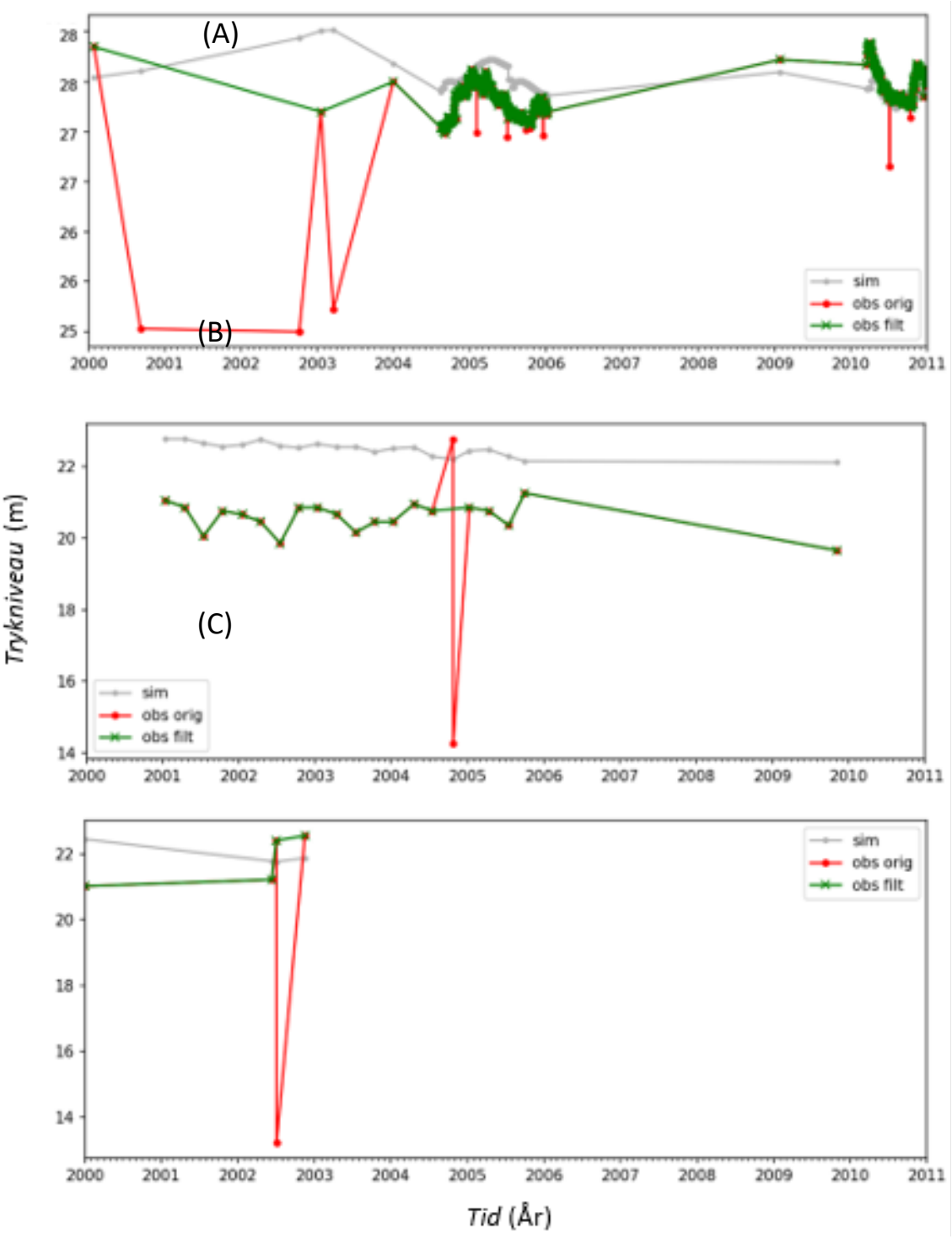
Trin 3, Manuel (tidsserier): Alle tidsserier med minimum én observation hver måned i løbet af mindst ét år er anvendt i kalibreringen af amplituden i de terrænnære og dybe grundvandsmagasiner. Disse tidsserier (ca. 1000 fra perioden 2000 – 2010) er gennemgået manuelt for fejlmålinger, indvindingspåvirkninger og generelt for at sikre at de observerede trykniveauvariationer repræsenterer naturlige sæson amplituder. Dette trin blev udelukkede udført for perioden 2000 – 2010. Dette datasæt bliver også anvendt som træningsdatasæt i næste trin. Eksempler er vist i Figur 13.

Trin 4, RF classifier: En maskinlæringsalgoritme (Random Forest classifier, RF) blev trænet med de tidsserier fra den manuelle gennemgang i trin 3. Denne RF classifier "lærer" hvilke observationer der sandsynligvis er outliers, baseret på forskellige statistiske størrelser som observeret grundvandsstand, standardafvigelse, afvigelse fra median, afvigelse fra glidende gennemsnit, lineær tendens, ændringsrate, etc. Algoritmen blev anvendt på tidsserier med mindst 20 observationer (ca. 2500 fra perioden 2000-2010), som ikke blev gennemgået i trin 3 fordi nogle måneder i disse tidsserier mangler data. Desuden blev algoritmen brugt til at filtrere outliers i de to valideringsperioder, hvor der ikke blev foretaget en manuel gennemgang som beskrevet i trin 3.

Trin 5, Median filter: Kortere tidsserier med 3 til 19 observationer i hele perioden er gennemgået med fejlmålinger med et simpelt medianfilter, hvor datapunkter med mere end 5 m afvigelse fra medianen blev frasorteret.

Trin 6, Difference filter: Korte tidsserier med kun 2 observationer blev fjernet, hvis de to observationer afviger med mere end 5 m fra hinanden.

Pga. det store model setup med flere tusinder indtag der anvendes til pejling, er pejlingerne medtaget i kalibrering ved anvendelse af programmet "LayerStatistics" (Hydroinform IT 2017): Med LayerStatistics er det muligt at sammenligne observationsværdier fra pejlinger med de tilsvarende simulerede værdier fra modellen ved angivelse af deres x, y, z-koordinater (z-koordinaten svarer til dybden til filtermidtpunkt), tidspunkt for observationen samt den observerede værdi. Programmet udtrækker det simulerede potentiale for det tilsvarende tidspunkt på den samme lokalitet og beregner forskellen mellem den observerede og simulerede værdi. Da der ikke gemmes data for hvert tidskridt udtrækkes data for den nærmeste dato, hvor der er gemt data i MIKE SHE resultatfilen. Det simulerede potentiale beregnes ved en bi-lineær interpolation af potentialet i de fire omkringliggende gridceller.



*Figur 13: Tre eksempler på filtrering af pejledata, **sim**: simuleret trykniveau, **obs orig**: observeret trykniveau <u>før</u> filtrering og **obs filt**: observeret trykniveau <u>efter</u> filtrering. (A) Eksempel på Manuel filtrering af tidsserier til amplitude (trin 2). (B) Eksempel på RF classifier filtrering af tidsserie hvor to observationer er fjernet fra datasættet (trin 3). (C) Eksempel på Median filtrering hvor en observation er fjernet fra datasættet (trin 4).*

1.2.6. Databehandling af sødata

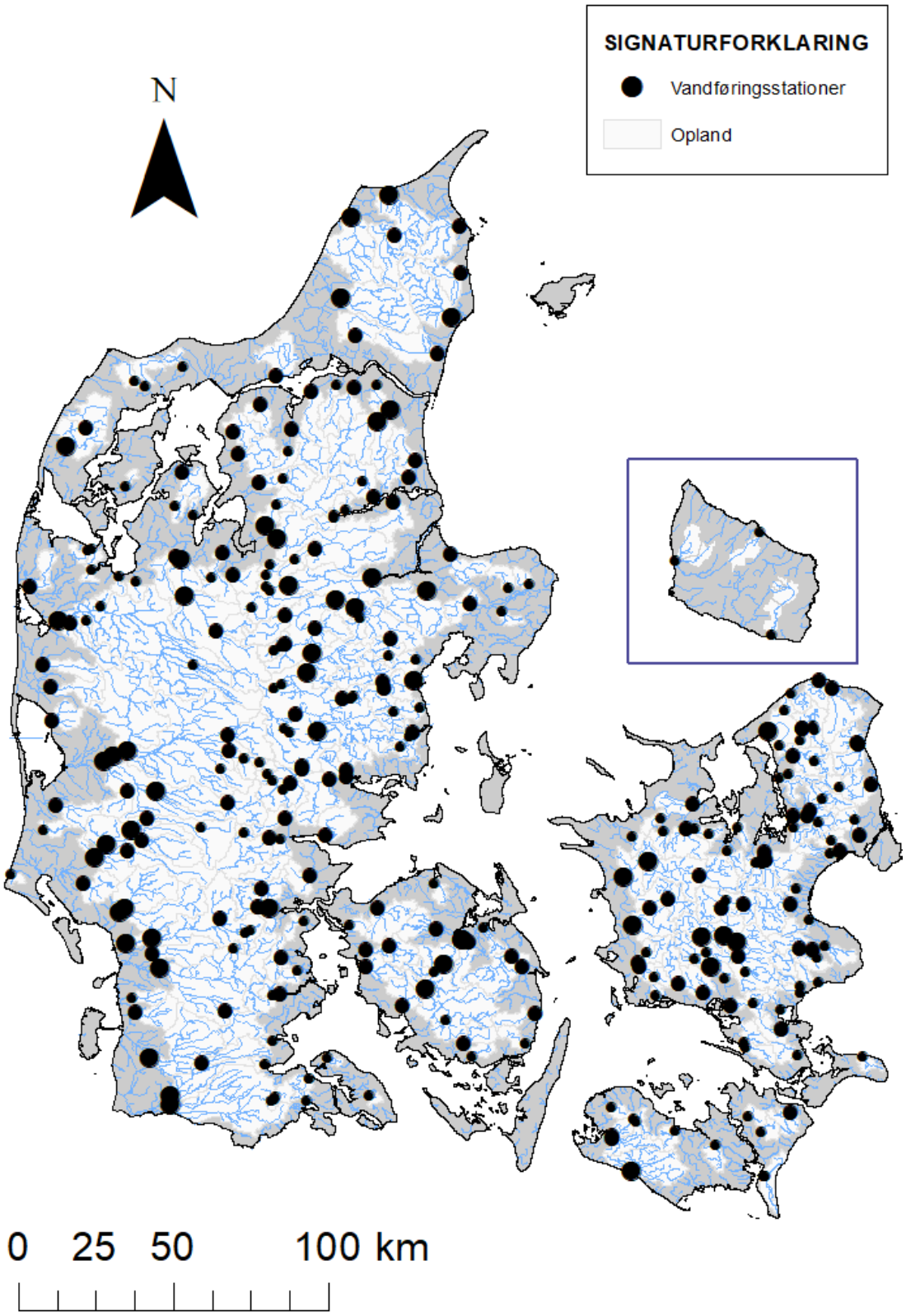
Der har bl.a. fra brugergrupper i forbindelse med forprojektet til HIP4Plus været efterspurgt en analyse af hvorvidt søer og vandhuller kan bidrage til optimering af DK-modellen, særligt med hensyn til det terrænnære grundvand. Antagelsen bag dette er at søer som er grundvandskoblede potentielt udgør vigtig og repræsentativ information om beliggenheden af det terrænnære grundvand. Kun de allerstørste søer i Danmark er eksplicit inkluderet i DK-modellen, derfor udgør de resterende søer en potentiel kilde til at udbygge datasættet til kalibrering. Det er dog langtfra alle søer som vurderes egnet til at repræsentere det terrænnære grundvand i en regional grundvandsmodel.

Der er derfor i HIP4Plus udarbejdet en analyse med udgangspunkt i de, i alt 178.873, registrere søer i det Fællesoffentlige Geografiske Administrationsgrundlag, hvor søernes vandspejl er bestemt fra centroidernes placering i en 1,6 m digital højdemodel. Alt sødata repræsentere derfor vandstanden d. 31-12-2007. I alt er 19.074 søer udvalgte som værende grundvandskoblede på baggrund af et minimumsareal på 100m^2, en minimumsafstand 200 m fra søernes bred til vandløb, en minimumsafstand til på 100m fra søernes bred til pejlinger brugt i kalibreringen og en mindre end estimeret drænsandsynlighed på mindre end 50% (Møller, et al. 2018) indenfor en 500m buffer zone fra søerne.

Resultaterne er sammenlignet med de terrænnære pejledata fra DK-model2019 for at vurdere om søerne viser den samme rumlige fordeling af middelfejlen og derfor ikke er i uoverensstemmelse med pejledata. Resultaterne viser en sammenfaldende fordeling af middelfejlen imellem søer og terrænnære pejlinger. Søerne forventes derfor at kunne bidrage til optimeringen af modellen i områder hvor der simuleres en for lav grundvandsstand og desuden udgøre et komplimenterende datasæt i områder med få pejlinger. På Bornholm er bruget af sødata fravalgt grundet den komplekse geologi.

1.2.7. Databehandling af vandføringsdata

Udvælgelse af vandføringsstationer er baseret på samme kriterier som er anvendt i DK-model2019 (Stisen, Ondracek, et al. 2019). Der anvendes i HIP4Plus vandføringsdata fra 308 stationer i kalibreringen, se Figur 14. Udvælgelsen af vandføringsstationer er baseret på en minimumsoplandsstørrelse på 10 km², driftsperiode med minimum data i en 5-årig periode i kalibreringsperioden samt stationer påvirket af løbende reguleringer i vandløbet er ikke medtaget. Til validering af modellen anvendes der 293 stationer i valideringsperiode 1 og 216 stationer i valideringsperiode 2.



Figur 14: Placering af vandføringsstationer anvendt til kalibrering af DK-model HIP. Oplandsarealet for den enkelte vandføringsstation er repræsenteret ved cirkelstørrelsen: små oplande: <100 km², mellem store oplande: 100-200 km² og store oplande: >200 km².

1.2.8. Opstilling af kalibreringsmål og nøjagtighedskriterier

Til modelkalibreringen er der opstillet en række nøjagtighedskriterier for en række observationsgrupper til beskrivelse hvor godt modellen er i stand til at simulere observationerne. Både kvantitative og kvalitative nøjagtighedskriterier anvendt i projektet tager udgangspunkt i Geovejledning 2017/1. Da kriterierne fra Geovejledning 2017/1 er formuleret på baggrund af den Nationale Vandressourcemodel, hvis fokus er på de dybere vandressourcer, er der som del af HIP4Plus projektet formuleret tre nye kriterier for simuleringen af dybden til det terrænnære grundvand (kriterium 10, 11 og 12), se Tabel 10.

Nøjagtighedskriterierne for afstrømningen er justeret i forhold til Geovejledning 2017/1. Dette skyldes blandt andet tilføjelsen af et stort antal mindre vandføringsstationer, som siden formuleringen af Geovejledningen 2017/1 har introduceret nogle uhensigtsmæssigheder i metoden til kategorisering af typevandløb og oplandstyper. Der er endnu ikke opstillet nøjagtighedskriterier for Kling-Gupta efficiency (KGE) (Gupta, et al. 2009) og maksimumsafstrømningen (Q01) og derfor er der som en del af HIP4Plus opstillet vejledende nøjagtighedskriterier på basis af opnået performance med den Nationale Vandressourcemodel 2019.

Disse kvantitative kriterier, mindre justeringer og observationsgrupper gennemgås nærmere for hhv. Pejledata, vandføringsdata samt markvanding i afsnit 1.2.9, 1.2.10 og 1.2.11. I Tabel 10 vises anvendte kvantitative nøjagtighedskriterier i HIP4Plus projektet hvor formålet overordnet er en levering af modelsimuleringer på screeningsniveau.

For de kvalitative kriterier bør det gælde at, de estimerede parametre har realistiske værdier, residualer er rimeligt jævnt fordelt i tid og rum, og områdets hydrologiske karakteristika reproduceres af modellen, fx rumlige variationer i dybden til terrænnært grundvand, amplitude på dybde til terrænnært og dybere grundvandstrykniveau, hydrograf- og vandstandsdynamik, vandbalance samt simulering af ændringer som følge af klimaændringer.

Tabel 10: Numeriske mål for nøjagtighedskriterier til vurdering af observationsgrupper for den simulerede vandføring (KGE, WBE, WBEs, Q_{01-E} og T_{X-E}) og for trykniveau (ME90% og MAE90%).

KRITERIUM	UNDER SCREE-NING	SCREENING	OVERSLAGS-BREGNING	DETAIL-MODELLERING
Kriterium 6 WBE (75 % af stationerne skal overholde kravværdien) (WBE, år)				
Type 1 Q_{50} < 100 l/s	>40	40-25	25-15	<=15
Type 2 100 l/s < Q_{50} < 500 l/s	>25	25-15	15-10	<=10
Type 3 500 l/s < Q_{50} < 2000 l/s	>15	15-10	10-5	<=5
Type 4 2000 l/s < Q_{50}	>10	10-5	5-3	<=3
Kriterium 7 WBs(75 % af stationerne skal overholde kravværdien) (WBE, sommer)				
Type 1 Q_{90} < 15 l/s	>80	80-40	40-25	<=25
Type 2 15 l/s < Q_{90} < 250 l/s	>50	50-25	25-15	<=15
Type 3 250 l/s < Q_{90} < 1000 l/s	>30	30-15	15-10	<=10
Type 4 1000 l/s < Q_{90}	>15	15-10	10-5	<=5
Kriterium 8 KGE (75% af stationer skal overholde kravværdien)				
Type 1 Q_{50} < 100 l/s	<0,50	0,50-0,60	0,60-0,70	>=0,70
Type 1 Q_{10}/Q_{90} < 5	<0,50	0,50-0,60	0,60-0,70	>=0,70
Type 2 5 < Q_{10}/Q_{90} < 10	<0,55	0,55-0,65	0,65-0,75	>=0,75
Type 3 10 < Q_{10}/Q_{90} < 20	<0,60	0,60-0,70	0,70-0,80	>=0,80
Type 4 20 < Q_{10}/Q_{90}	<0,65	0,65-0,75	0,75-0,85	>=0,85
Kriterium 9A Q_{01-E} (75 % af stationerne skal overholde kravværdien)	>50	50-30	30-15	>=15
Kriterium 9B T_{x-E} (75 % af stationerne skal overholde kravværdien)	>50	50-30	30-15	>=15
Kriterium 10 ME90% Terrænnære og dybe pejlinger	>1,0	0,5-1,0	0,2-0,5	<0,2
Kriterium 11tn MAE90% Terrænnære pejlinger	>2,0	1,0-2,0	0,5-1,0	<0,5
Kriterium 11db MAE90% Dybe pejlinger	>3,0	2,0-3,0	1,0-2,0	<1,0

1.2.9. Nøjagtighedsmål for trykniveaudata

Til kvantificering af modellens evne til at kunne simulere observerede trykniveauer, er der i HIP4Plus-anvendt to kriterier: Middelfejlen (ME) og den absolutte middelfejl (MAE). Begge størrelser beskrives i følgende afsnit.

ME beskriver den generelle bias i forhold til samtlige trykniveauobservations. Selvom ME samlet set er lille, kan den dække over store positive og negative afvigelser, der opvejer hinanden. En ME omkring 0 indikerer at de simulerede trykniveauer ikke har en bias i forhold til en generel over- eller underestimering. Denne beregnes ved følgende funktionsudtryk (1):

$$\mathrm{ME} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\mathrm{H}_{\mathrm{sim,i}} - \mathrm{H}_{\mathrm{obs,i}}) \qquad (1)$$

En variant af ME er MAE, hvor den absolutte værdi af residualer benyttes. Herved sikrer man, at fx betydelige positive og negative residualer ikke ophæver hinanden. MAE vil afsløre fejl af denne type og kan derfor være et vigtigt supplement til ME i vurderingen af den gennemsnitlige fejl. Denne beregnes ved følgende funktionsudtryk (2):

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(|\mathrm{H}_{\mathrm{sim,i}} - \mathrm{H}_{\mathrm{obs,i}}|) \qquad (2)$$

Der anvendes en objektivfunktion som er udviklet i forbindelse med metodeudviklingsprojektet for simulering af terrænnært grundvand og vand på terræn (Stisen, Schneider, et al. 2018). Denne objektivfunktion er CRPS (Continuos Ranked Probability Score), som rutinemæssigt anvendes til ensemble forecast evaluering (Gneiting, et al. 2005). Her er den omformuleret til at beskrive residualen i simuleret trykniveau på tværs af et stort antal pejleboringer. For en detaljeret beskrivelse af CRPS objektivfunktionen henvises til (Schneider, Henriksen og Stisen 2020).

Formålet med CPRS er at mindske det store vægt, som konventionelle kvadratfejl-baserede objektivfunktioner sætter på store fejl. Det betyder, at man har en højre vægt i parameteroptimeringen på at ramme det store flertal af pejlinger, som modellen er i stand til at simulere tilfredsstillende, i stedet for at muligvis sætte for meget vægt på outliers som trækker kalibreringen f.eks. til at ende med en stor bias. Det antages, at de største fejl er "uden for rækkevidde" i kalibreringen, muligvis fordi de enten skyldes observationsfejl eller modelstrukturfejl. Fordelen er, at man ikke på forhånd skal tage subjektivt stilling til hvilke pejlinger, som er "uden for rækkevidde", samt at man stadig kan afrapportere den samlede model fejl (som kan blive større, afhængigt af hvordan man beregner den), og at man kan få udpeget områder, hvor store fejl er konsistente, og hvor man derfor bør udvikle modellen ved næste opdatering.

Til vurdering af modellens performance angives ME og MAE i forhold til de 90% bedste af observationerne (ME90% og MAE90%), da kendskabet til de enkelte observationers målefejl ikke foreligger pga. den betydelige datamængde og forskellige kilder (Stisen, Schneider, et al. 2018). Vurderingen af

trykniveafvigelsen foretages for henholdsvis terrænnære og dybe trykniveauer, kriterierne kan findes i Tabel 10.

1.2.10. Nøjagtighedsmål for vandføringsdata

Til kvantificering af modellens evne til at kunne simulere den observerede afstrømning, er der i HIP4Plus anvendt de tre kriterier; Kling-Gupta efficiency (KGE), vandbalancefejlen (WBE) og sommervandbalancen (WBEs). Alle tre størrelser beskrives i følgende afsnit. Maksimumsafstrømningen (Q01) er et anvendt nøjagtighedskriterie men ikke en del af kalibreringen.

I HIP4Plus er der anvendt KGE til at beskrive modellernes evne til at simulere vandføringsdynamikken. KGE beskriver modellens performance ud fra de tre delelementer, korrelation, variabilitet og bias. KGE beregnes ved følgende funkionsudtryk (3):

$$\mathrm{KGE} = 1 - \sqrt{(\mathrm{r}(\mathrm{Q_{sim}}, \mathrm{Q_{obs}}) - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{\mathrm{Qsim}}}{\sigma_{\mathrm{Qobs}}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{\mathrm{Qsim}}}{\mu_{\mathrm{Qobs}}} - 1\right)^2} \qquad (3)$$

Hvor r, α, og μ referere til henholdsvis korrelationskoefficient, standard afvigelse og middelværdi. Styrken ved KGE er, at den dels muliggør en analyse af hvilke komponenter af den observerede afstrømning modellen bedst kan genskabe og dels at den bevæger sig i et andet interval selv for stationer som ikke performer optimalt, i forhold til Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), som kan antage store negative størrelser og dermed dominere kalibreringen (kvadratafvigelsessummen). For en sammenligning af KGE med NSE se evt. (Knoben, Freer og Woods 2019).

Da både KGE og NSE udtrykker hvor stor en del af den totale vandføringsdynamik modellen kan forklare, tages der under formuleringen af KGE nøjagtighedskriterier, udgangspunkt i NSE kriteriet jævnfør Geo-vejledning 2017/1 (Henriksen, et al. 2017). Dette gælder i forhold til inddeling af oplandstyper og kravværdierne, da KGE kriteriet ikke er en del af Geovejledning 2017/1.

Ved evaluering af nøjagtigheden af KGE skelnes der, jævnfør NSE kriteriet i Geo-vejledning 2017/1, imellem 4 oplandstyper baseret på variationen i vandføringen over året ($Q_{var} = Q_{10}/Q_{90}$): Oplandstype 1 Q_{var} (< 5), Oplandstype 2 Q_{var} (5 - 10), Oplandstype 3 Q_{var} (10 - 20) og Oplandstype 4 Q_{var} (> 20). Denne inddeling medfører en gradvis overgang fra primært oplandstype 1 mode vest til primært oplandstype 4 i øst, hvilket er en forventelig rummelig fordeling i forhold til Q_{var}. En problematik i forhold til denne inddelingsmetode er at mange af de meget små vandføringsstationer, med større usikkerhed, i den østlige del af landet bliver kategoriseret som oplandstype 4 med meget strenge performance kravværdier.

I stedet for udelukkende at vurdere oplandstypen på Q_{var}, vil en indledende inddeling, baseret årlige middelvandføring Q_{50}, kunne samle de mindste vandføringsstationer (< 100 l/s) som oplandstype 1.

Med denne indledende inddeling af oplandstyper vil man få en mere retvisende fordeling af nøjagtigheden over hele landet, fordi de mindste vandføringsstationer ikke vil dominere performancestatistikken i den østlige del af landet.

Det har generelt været en udfordring at nå et ønsket nøjagtighedsniveau grundet de meget strenge kravværdier angivet i Geo-vejledning 2017/1 (Henriksen, et al. 2017). Dette skyldes blandt andet at antallet af vandføringsstationer, medtaget i kalibreringen, er steget fra omkring 100 stationer til 308 stationer, hvoraf en større del af stationen repræsenterer små oplande, som har svært ved af opfylde de hårde kravværdier fra Geo-vejledning 2017/1. Ved at sænke alle kravværdier for NSE kriteriet jævnfør Geo-vejledning 2017/1 med 0.05, vurderes det at omkring 75% af stationerne vil kunne overholde en nøjagtighed på screeningsniveau for KGE. Se oplandstype inddeling og kravværdier for KGE i Tabel 10.

WBE er et mål for afvigelsen mellem observeret og simuleret vandføring for en simuleringsperiode. En variant heraf er sommervandbalancen som er et mål fro afvigelsen mellem observeret og simulere afstrømning i sommermånederne juni-juli-august. WBE beregnes ved følgende funktionsudtryk (4):

$$\mathrm{WBE} = 100\frac{\overline{\mathrm{Q}}_{\mathrm{sim}} - \overline{\mathrm{Q}}_{\mathrm{obs}}}{\overline{\mathrm{Q}}_{\mathrm{obs}}} \tag{4}$$

Ved evaluering af nøjagtigheden af vandbalancen (WBE) anvendes kriterier jævnfør Geovejledning 2017/1. Ved evaluering af nøjagtigheden af sommervandbalancen (WBEs) skelnes der, jævnfør Geovejledning 2017/1 imellem 4 grupper af minimumsvandføring (Q_{min}): (Q_{min} ~ middel sommervandføring jun-jul-aug): meget små Q_{min} (< 10 l/s), små Q_{min} (10 – 50 l/s), mellemstore Q_{min} (50-200 l/s) og store Q_{min} (> 200 l/s). Denne inddeling medfører at størsteparten af vandføringsstationerne enten falder indenfor gruppen "meget små Q_{min}" eller "store Q_{min}", hvilket ikke er den forventede fordeling af typevandløb.

Ved i stedet at vurdere vandløbstypen på baggrund af Q_{90} og hæve grænseværdierne for typefordelingen til: meget små Q_{90} (< 15 l/s), små Q_{90} (15 – 250 l/s), mellemstore Q_{90} (250-1000 l/s) og store Q_{90} (> 1000 l/s), får man et mere robust mål for en lav middel sommervandføring og en mere jævn fordeling af stationerne imellem de 4 grupper, med flest stationer indenfor grupperne små til mellemstore vandløb. Denne typefordeling baseret på Q_{90} er mere sammenlignelig med typefordelingen for den årlige vandbalance (WBE), som baseres på middelvandføringen. Overordnet betyder dette at vi skruer en smule ned for nøjagtighedskravende, for de mindre vandløb mod vest og en smule op for kravene til de større vandløb mod øst.

Q01 er et mål for afvigelsen mellem observeret og simuleret maksimumsvandføring (5) for en simuleringsperiode. Nøjagtighedsmålet anvendes ikke som observationsgruppe i kalibreringen men udelukkende til validering af modellens evne til at simulere maksimumsvandføring. Kriteriet findes i Tabel 10.

$$\mathrm{Q}_{01-\mathrm{E}} = \frac{\mathrm{Q}_{01,\mathrm{sim}} - \mathrm{Q}_{01,\mathrm{obs}}}{\mathrm{Q}_{01,\mathrm{obs}}} \tag{5}$$

Procent fejl af T års-hændelser (T_{X-E}) er et mål for afvigelsen mellem observeret og simuleret vandføring for en simuleringsperiode (6). Procent fejl af T års hændelser er beregnet for stationer hvor observationerne dækker mindst 25 år (med et af minimum 355 observationer pr. år).

$$T_{X-E} = 100 \frac{T_{x-E,sim} - T_{x-E,obs}}{T_{x-E,obs}} \tag{6}$$

1.2.11. Observationsgruppe for markvanding

I DK-model HIP er den simulerede vandmængde til markvandingen inkluderet som en objektiv funktion og med en nationale kalibrerings metodik sikres det at parametre som påvirker markvanding, er rumligt konsistente på tværs af Jylland. Markvanding i Jylland beregnes dynamisk og afhænger af klima, jordtype og arealanvendelse, se afsnit 1.1.5. Den objektiv funktion som er anvendt, er en root mean squared error (RMSE) på årlige markvandingsværdier (I_{obs}) (7), altså modellens evne til at beregne den samlede markvanding og år-til-år variationer. Objektivfunktionen vurderer ikke om markvandingen foregår på de rette steder eller på de rette dage. Da markvanding i modellen kun er mulig fra boringen som i Jupiter er markeret som markvandingsboringer (V40) vurderes det at markvandingens rumlige fordeling vil afspejles fornuftigt ved kombinationen af information om boringsplaceringer, jordtype og afgrødetype.

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(I_{obs} - I_{sim})^2} \tag{7}$$

1.2.12. Samlet objektivfunktionen

Den inverse kalibrering blev gennemført i PEST ver. 16 (Doherty 2015). Formålet med en kalibrering er at minimere residualerne mellem de observerede og simulerede variable. Dette gennemføres ved at opstille en objektiv funktion (8), der angiver et mål for residualerne, som funktion af de anvendte modelparametre og derefter søge at minimere denne funktion vha. en matematisk algoritme.

$$G(\underline{b}) = \sum_{i=1}^{n} w_i {r_i}^2 \tag{8}$$

hvor $\underline{b}$ er en vektor med kalibreringsparametrene, r_i er residualet for den i'te observation og dennes simulerede værdi og w_i er vægten af det i'te residual. Objektivfunktionen er således en vægtet kvadratsum af residualerne, på engelsk benævnes denne weighted summed squared residuals (SSR_w). I tilfældet hvor residualerne ikke vægtes, benævnes objektivfunktion blot summed squared residuals (SSR). Vægtningen af de enkelte residualer gør det muligt at lade de enkelte residualer have forskellig betydning under optimeringen, dvs. hvor meget vægt PEST skal tillægge de enkelte residualer i dens

forsøg på at opnå en optimal løsning. Ideelt skal vægtningen af de enkelte residualer reflektere den forventede usikkerhed på observationerne, så observationer med stor usikkerhed tæller mindre i optimeringen end observationer med lille usikkerhed, hvilket kan gøres ved at vægte de enkelte observationer med den reciprokke værdi af standardafvigelsen på observationen ($1/s_{obs}$).

En detaljeret vurdering af usikkerheden for samtlige potentialeobservationer er ikke praktisk mulig. I forbindelse med optimeringen af modelparametrene er det imidlertid ikke den faktiske værdi af vægtningen, men derimod den relative vægt mellem de enkelte observationer og observationsgrupper, der er vigtig. I nærværende optimering er det derfor valgt at anvende en simpel vægtning, sammensat af de variable som modellen efterfølgende ønskes anvendt til at simulere (9). Dette er opnået ved at opstille en objektiv funktion med bidrag fra hver af observationsgrupperne gennemgået ovenfor.

$$G(\underline{b}) = \sum_{j=1}^{m} v_j \sum_{i=1}^{n} w_i r_i^2 \qquad (9)$$

hvor j er antallet af bidrag til objektivfunktionen (dvs. observationsgrupper) og v_j er vægten af det j'te bidrag. Med w_i kan residualerne således vægtes inden for én observationsgruppe, mens det er muligt at foretage en vægtning mellem de enkelte observationsgrupper med v_j.

I kalibreringen er det tilstræbt at opnå en balanceret vægtning mellem potentialer og vandløbsafstrømningen, dvs. sikre at de to observationstyper bidrog omtrentligt lige meget til den samlede objektivfunktion for den optimerede model. Dette kan kontrolleres ved justering af vægtningen mellem de forskellige observationsgrupper (v_j). Formålet med optimeringen er en reduktion af residualerne og under optimeringen vil disse ændres. Én iteration under optimeringen med PEST kan derfor resultere i, at residualet primært reduceres for den ene af de to observationstyper. Da observationernes bidrag til den samlede objektivfunktion er produktet af residualet og den anvendte vægtning, vil bidragene fra de enkelte observationsgrupper ændre sig løbende gennem optimeringen. En balanceret vægtning er derfor søgt tilgodeset ved at anvende "fornuftige" startgæt på parameterværdier (baseret på erfaringer fra tidligere versioner af modellen, og beregne en vægtning mellem de enkelte observationsgrupper der sikrede en balanceret vægtning mellem potentialer og vandføringsdata for dette startgæt.

Objektivfunktionen kan enten bestå af en enkelt norm for residualerne for en enkelt type af observationer, f.eks. middelfejlen på simulerede potentialer. Alternativt kan objektivfunktionen sammensættes af forskellige bidrag og f.eks. inkludere forskellige statistiske størrelser (metrics) og/eller forskellige observationstyper. Ved at inddrage forskellige variabler og observationstyper i objektivfunktionen opnås en bedre udnyttelse af observationsdata, samt en mere robust kalibrering, hvor der ikke fokuseres ensidigt på modellens evne til at simulere en enkelt variabel. Ved anvendelse af forskellige variable og metrics i objektivfunktionen vil kalibreringen desuden bidrage med et kvantitativt mål for, hvor god modellen er til at repræsentere de forskellige størrelser. En sådan multi-variabel objektiv funktion anvendes til kalibrering af DK-model HIP, hvor forskellige metrics for vandføring kombineres med metrics for trykniveau samt markvandingsvolumen i én samlet objektiv funktion.

Inden for de enkelte observationsgrupper er der foretaget en simpel vægtning. For pejlingerne er hvert modelgrid implicit vægtet efter antallet af observationer bag grid middelfejlen som en del af CRPS beregningen.

For vandføringen ønskes modellen at kunne reproducere alle de medtagede stationer uanset den faktiske oplandsstørrelse. Dog ønskes det at vandbalancen prioriteres særligt for de største oplande da modellens overordnede vandbalance har højest prioritet. Desuden er der en overrepræsentation af små stationer med et oplandsareal på under 100 km^2. Anvendes der derfor en ligelige vægtning af alle stationer under kalibreringen, vil det resultere i en større vægtning af små stationer, mens de større stationer vil vægte mindre.

Baseret på vandløbsstationernes oplandsstørrelser er der derfor foretaget en opdeling af vandløbsobservationerne i tre oplandsgrupper: små oplande: < 100 km^2; mellem store oplande*:* 100 – 200 km^2 og små oplande*:* > 200 km^2. Inden for observationsgrupperne KGE, WBE og WBEs er det således muligt at vægte hver gruppe forskelligt så der opnås en ønsket vægtning imellem de pågældende *opland*-grupper.

Den samlede vægtning for de enkelte observationsgrupper er gengivet i Tabel 11. Den samlede objektivfunktion bliver da summen af alle observationsgrupper. Her vægtes vandføring samlet med 60, pejlinger samlet med 81, søer samlet med 26, amplituder samlet med 50, mens markvanding vægtes med 2. Disse vægte knytter sig til det initiale parametersæt og vil ændres i takt med parameteroptimeringen. Ved at vægte observationsgrupperne forskelligt påvirkes kalibreringen da den samlede objektiv funktion reduceres mest ved samme relative forbedring af residualer i en observationsgruppe med stor vægt. Er der ingen trade-off mellem observationsgrupperne, vil vægtningen ingen betydning have, men vægtningen har betydning når en given parameter ændring påvirker flere objektivfunktioner i forskellig retning.

Tabel 11: Vægtning inden for og imellem observationsgrupperne.

Observationsgrupper	*Forklaring*	*Vægtning mellem grupper*	**Intern vægtning**
WBE_S	Vandbalancefejl [%] små stationer	4.0	
WBE_M	Vandbalancefejl [%] mellem stationer	8.0	
WBE_L	Vandbalancefejl [%] store stationer	10.0	
WBEs_S	Sommer Vandbalancefejl [%] små stationer	2.0	
WBEs _M	Sommer Vandbalancefejl [%] mellem stationer	4.0	
WBEs _L	Sommer Vandbalancefejl [%] store stationer	6.0	
KGE_S	Kling-Gupta efficiency [-] små stationer	6.0	
KGE_M	Kling-Gupta efficiency [-] mellem stationer	8.0	
KGE_L	Kling-Gupta efficiency [-] store stationer	12.0	
DK1_w_crps_tn	CRPS fejl [m] DK1 terrænnære pejlinger	10.0	Efter antal obs.
DK2_w_crps_tn	CRPS fejl [m] DK2 terrænnære pejlinger	5.0	Efter antal obs.
DK3_w_crps_tn	CRPS fejl [m] DK3 terrænnære pejlinger	10.0	Efter antal obs.
DK4_w_crps_tn	CRPS fejl [m] DK4 terrænnære pejlinger	10.0	Efter antal obs.
DK5_w_crps_tn	CRPS fejl [m] DK5 terrænnære pejlinger	10.0	Efter antal obs.
DK6_w_crps_tn	CRPS fejl [m] DK6 terrænnære pejlinger	10.0	Efter antal obs.
DK1_w_crps_db	CRPS fejl [m] DK1 dybe pejlinger	5.0	Efter antal obs.
DK2_w_crps_db	CRPS fejl [m] DK2 dybe pejlinger	1.0	Efter antal obs.
DK3_w_crps_db	CRPS fejl [m] DK3 dybe pejlinger	5.0	Efter antal obs.
DK4_w_crps_db	CRPS fejl [m] DK4 dybe pejlinger	5.0	Efter antal obs.
DK5_w_crps_db	CRPS fejl [m] DK5 dybe pejlinger	5.0	Efter antal obs.
DK6_w_crps_db	CRPS fejl [m] DK6 dybe pejlinger	5.0	Efter antal obs.
DK1_w_crps_søer	CRPS fejl [m] DK1 søer	5.0	Efter antal obs.
DK2_w_crps_søer	CRPS fejl [m] DK2 søer	1.0	Efter antal obs.
DK3_w_crps_søer	CRPS fejl [m] DK3 søer	5.0	Efter antal obs.
DK4_w_crps_søer	CRPS fejl [m] DK4 søer	5.0	Efter antal obs.
DK5_w_crps_søer	CRPS fejl [m] DK5 søer	5.0	Efter antal obs.
DK6_w_crps_søer	CRPS fejl [m] DK6 søer	5.0	Efter antal obs.
ME_amp_tn	ME årsamplitude i terrænnære pejletidsserier	30.0	
ME_amp_db	ME årsamplitude i dybe pejletidsserier	20.0	
RMSE_vanding	RMSE på årlige markvanding [mio. m^3/år]	2.0	

1.3. Resultater af kalibrering og validering

I det følgende afsnit beskrives den kvantitative vurdering af kalibrerings- og validerings resultater for simuleret trykniveau og vandføring.

1.3.1. Kvantitativ vurdering af trykniveau simuleringer

Tabel 12 angiver performancestatistik for pejledata for kalibreringsperioden og de to valideringsperioder, for den kalibrerede 100m model, 100m modellen med fuld 500m parametrisering, den kalibrerede 500m model og DK-model2019, for hhv. terrænnære (tn) og dybe pejlinger (db).

Sammenholdes den opnåede performance for den kalibrerede 100m model (nr. 1, Tabel 12) med de opstillede kriterier, ses det at modellen opfylder kriterierne for ME90% og MAE90% i kalibreringsperioden, både for de terrænnære og dybe observationer. Ved opdeling imellem TWI >/< 6 opfylder modellen også kriterierne, både for terrænnære og dybe observationer. ME90% er generelt størst for de terrænnære observationer, hvilket formodentligt skyldes inddragelsen af søerne i kalibreringen. MAE90% er generelt mindst for de terrænnære trykniveauer, som forventet på baggrund af vægtningen imellem de terrænnære og dybe observationsgrupper i objektivfunktionen. Performance i valideringsperioderne overholder kriterierne og er overordnet meget lig performance for kalibreringsperioden.

Generelt viser performance for søerne at modellerne underestimere trykniveauerne, Tabel 13. Søerne og de terrænnære pejlinger har forskellig vægtning i objektivfunktionen hvorfor middelfejlen for søerne generelt er større da de terrænnære pejlinger trækker trykniveauerne i terræn længere ned. I Figur 16 ses det at underestimeringen af søerne er størst i modeldomænerne DK5 og DK6.

Sammenholdes den kalibrerede 100m model med initial 100m modellen med fuld 500m parameteroverførsel er performance på trykniveauerne er performance nærmest ens. En kalibrering af 100m modellen har altså ikke haft den store indvirkning på trykniveauerne. En primær forbedring af ME90% og MAE90% ses primært overgangen fra 100m til 500m modelopløsning (nr. 2 og nr. 3, Tabel 12). Overordnet er den gennemsnitlige terrænnære ME90% og MAE90% forbedret hhv. ca. 0,7 m og ca. 0,4 m fra den kalibrerede 500m model. Denne tendens gælder også de dybe trykniveauer, som er forbedret med ca. 0,8 m og 0,3 m, Tabel 12. Sammenholdes performance med DK-model2019 med den kalibrerede 500m model ses det at den kalibrerede 500m model har en større ME90% end DK-model2019, både for de terrænnære og dybe observationer, hvilket kan skyldes den nye sø-observationsgruppe introduceret i HIP4Plus modellerne. I forhold til MAE90% performer den kalibrerede 500m model en smule bedre på de terrænnære observationer end DK-model2019, og en smule dårligere på de dybe observationer, hvilket er forventeligt grundet vægtningen af modellernes objektivfunktioner.
vises de sorterede middelfejl pr. modeldomæne for de kalibrerede 100m og 500m modeller. For hvert domæne vises middelfejlen i forhold til terrænnære og dybe observationer i kalibrerings- og valideringsperioderne. For modeldomænerne DK1 og DK2 er der generelt begrænset forskel imellem det simulerede trykniveau i 100m og 500m. For modeldomæne DK3 har ændringen af opløsningen bevirket en generel sænkning af trykniveauerne i boringer med tendens til overestimering af trykniveauerne, men uændret simulering af trykniveauerne i boringer med tendens til underestimering. For modeldomænerne DK4, DK5 og DK6 ses en general mindskning af modeldomænernes bias.

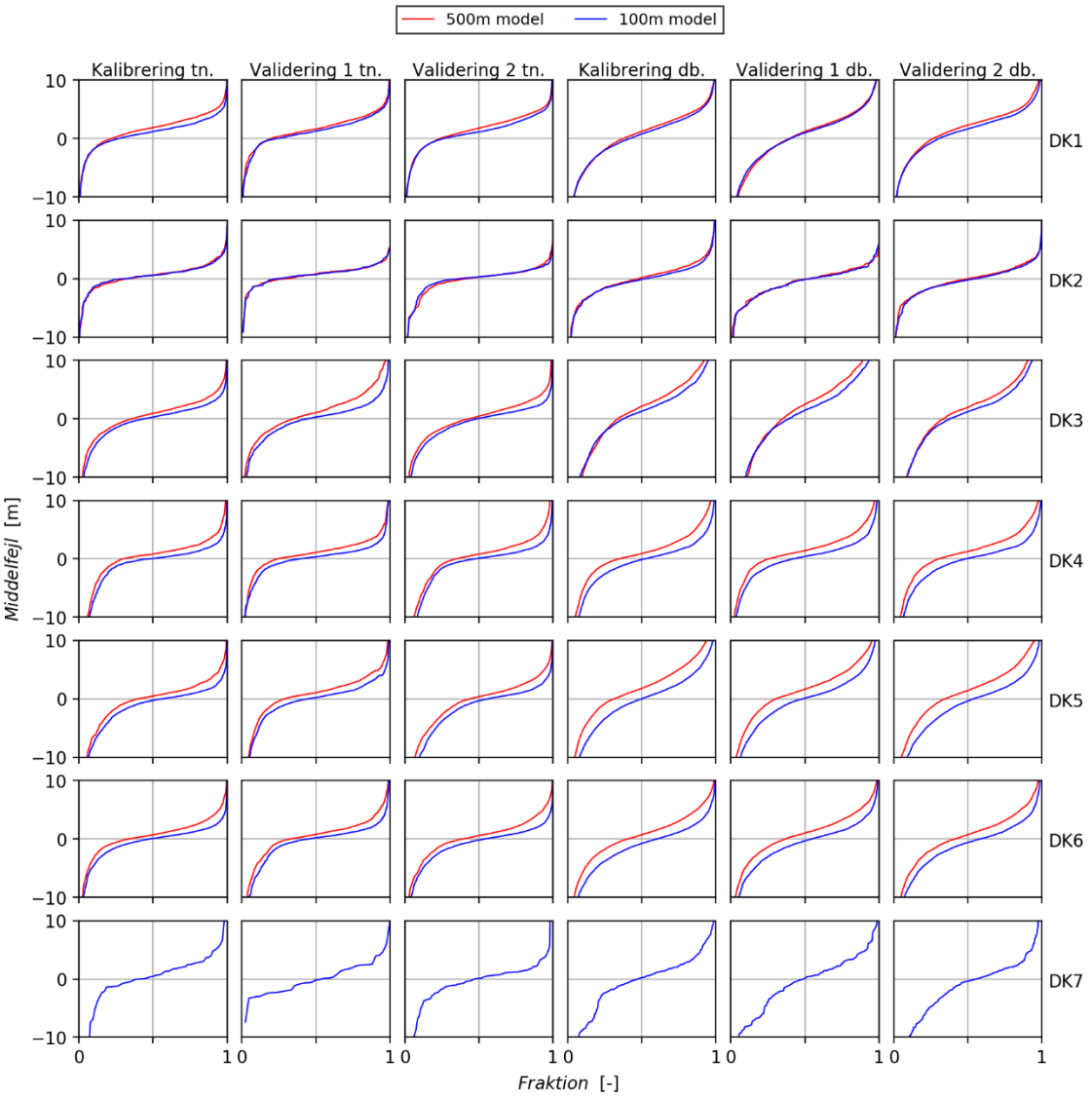
Generelt for alle domæner er antallet af terrænnære boringer med mindre overestimering dog større end antallet af boringer hvor underestimeringen er steget. Selvom klimadata for valideringsperioden 2011-2019 er fejlbehæftet, ser det ikke ud til at påvirke simuleringen af trykniveauerne for perioden betydeligt, dog ses der for flere af delmodellerne en vis stigning i antallet af boringer med større negative ME, både for de terrænnære og dybe trykniveauer. Dette stemmer overens med en underestimering i nedbøren.

Det ses at performance for modeldomæne DK1, , har en større positiv bias end resten af delmodellerne hvilket kan skyldes at en del af de terrænnære observationer i virkeligheden repræsentere hængende vandspejl der i kalibreringen har bidraget til en generel positiv bias ved at hive store dele af det Sjællandske grundvandsspejl op nær terræn. Det ses også at performance for de dybe trykniveauer i DK3 er markant ringere i forhold til andre delmodeller der viser en overestimering af trykniveauerne. Der har i tidligere DK-modeller været problemer med at ramme de terrænnære observationer på Fyn og en fokuseret kalibrering på netop de terrænnære trykniveauer i HIP4Plus har resulteret i en kraftig overestimering af trykniveauerne i modellens beregningslag nummer 5 for at hæve de terrænnære trykniveauer tilstrækkeligt. Da lagt størstedelen af trykniveauobservationerne i DK3 findes i netop dette beregningslag har dette haft en betydelig effekt på performance i de bydere lag.

Tabel 12: Tabellen viser trykniveauperformance, ME [m] og MAE [m], for pejledata, for kalibreret 100m model, 100m model med fuld parameteroverførsel fra kalibreret 500m model, kalibreret 500m og den Nationale Vandressourcemodel 2019. Tabellen viser i den øverste blok performance for henholdsvis terrænnære (<10 m) og dybe observationer (>1 0m). I nedre blok er terrænnære og dybe observationer inddelt i forhold til TWI >/< 6. Statistikken vises for kalibreringsperioden og de to valideringsperioder. Tallene er i rød hvor de ikke opfylder performance kriterier.

			Kalibreringsperiode				Valideringsperiode 1				Valideringsperiode 2			
pejledata			1*	2*	3*	4*	1	2	3	4	1	2	3	4
Alle observationer	Terrænnære	ME	**-0,53**	**-0,55**	**0,41**	**-0,45**	**-0,23**	**-0,21**	**0,80**	**0,11**	**-0,63**	**-0,63**	**0,28**	**-0,61**
		MAE	2,49	2,46	2,81	3,01	2,66	2,64	3,02	3,11	2,85	2,83	3,10	3,43
		ME90%	**0,38**	**0,33**	**0,97**	**0,46**	**0,41**	**0,43**	1,06	**0,56**	**0,34**	**0,30**	**0,90**	**0,33**
		MAE90%	**1,57**	**1,56**	**1,96**	2,06	**1,65**	**1,63**	2,05	2,12	**1,80**	**1,81**	2,17	2,37
	Dybe	ME	**-0,76**	**-0,56**	**0,67**	**0,16**	**-0,34**	**-0,20**	**0,87**	**0,51**	**-0,39**	**-0,23**	**1,00**	**0,42**
		MAE	3,94	3,93	4,18	3,64	3,83	3,83	4,17	3,65	3,90	3,88	4,19	3,78
		ME90%	**0,11**	**0,19**	1,07	**0,57**	**0,25**	**0,32**	1,16	**0,77**	**0,41**	**0,46**	1,31	**0,89**
		MAE90%	**2,78**	**2,77**	3,07	**2,61**	**2,68**	**2,69**	3,06	**2,62**	**2,72**	**2,71**	3,07	**2,69**
Terrænnære obs.	TWI > 6	ME	**0,10**	**0,09**	1,14	**0,37**	**0,46**	**0,48**	1,50	**0,74**	**0,45**	**0,47**	1,60	**0,73**
		MAE	2,06	2,04	2,49	2,58	2,31	2,30	2,69	2,71	2,09	2,06	2,73	2,80
		ME90%	**0,58**	**0,57**	1,23	**0,81**	**0,62**	**0,64**	1,18	**0,74**	**0,72**	**0,72**	1,48	1,21
		MAE90%	**1,38**	**1,37**	**1,84**	**1,84**	**1,44**	**1,44**	**1,84**	**1,86**	**1,51**	**1,50**	2,14	2,12
	TWI < 6	ME	**-0,87**	**-0,89**	**0,03**	**-0,89**	**-0,20**	**-0,20**	**0,59**	**-0,10**	**-0,41**	**-0,43**	**0,42**	**-0,27**
		MAE	2,71	2,67	2,98	3,23	2,55	2,49	2,71	2,80	2,45	2,42	2,91	2,93
		ME90%	**0,20**	**0,14**	**0,80**	**0,20**	**0,36**	**0,36**	**0,94**	**0,43**	**0,26**	**0,21**	1,06	**0,36**
		MAE90%	**1,69**	**1,67**	2,03	2,18	**1,72**	**1,70**	2,03	2,13	**1,77**	**1,79**	2,26	2,42
Dybe obs.	TWI > 6	ME	**-0,24**	**-0,07**	1,06	**0,62**	**0,03**	**0,15**	**0,88**	**0,97**	**-0,34**	**-0,18**	1,03	**0,74**
		MAE	3,59	3,57	3,84	3,26	3,48	3,46	3,82	3,13	3,47	3,44	3,72	3,10
		ME90%	**0,40**	**0,47**	1,22	**0,77**	**0,29**	**0,34**	1,02	**0,86**	**0,18**	**0,23**	1,05	**0,80**
		MAE90%	**2,58**	**2,56**	**2,87**	**2,40**	**2,55**	**2,54**	**2,92**	**2,34**	**2,43**	**2,43**	**2,75**	**2,24**
	TWI < 6	ME	**-0,96**	**-0,75**	**0,52**	**-0,02**	**-0,40**	**-0,25**	**0,60**	**0,51**	**-0,75**	**-0,57**	**0,63**	**0,30**
		MAE	4,07	4,06	4,31	3,77	3,89	3,88	4,16	3,42	3,88	3,86	4,14	3,59
		ME90%	**-0,01**	**0,08**	1,01	**0,47**	**0,04**	**0,10**	**0,85**	**0,61**	**0,04**	**0,08**	**0,95**	**0,64**
		MAE90%	**2,86**	**2,86**	3,16	**2,69**	**2,92**	**2,93**	3,20	**2,68**	**2,75**	**2,75**	3,09	**2,68**

1*: DK-model HIP 100m
2*: DK-model HIP 100m med fuld 500m parameteroverførsel.
3*: DK-model HIP 500m
4*: DK-model2019

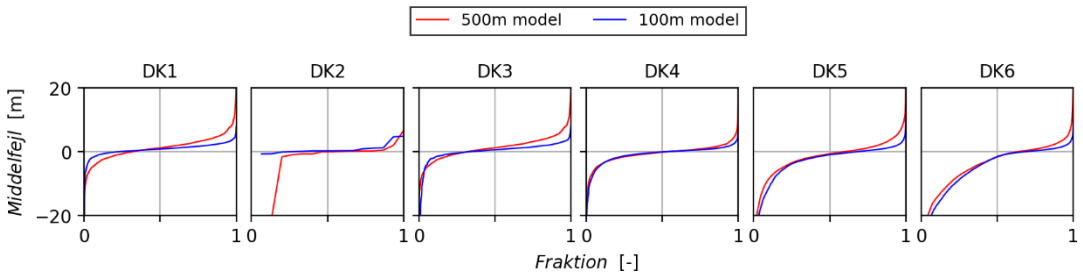


Figur 15: Figuren viser de sorterede ME for pejledata for hvert af de syv modeldomæner, for kalibreret 500m (rød) og kalibreret 100m (blå) modellerne.

Tabel 13: Tabellen viser trykniveauperformance, ME [m] og MAE [m], for sødata, for kalibreret 100m model, 100m model med fuld parameteroverførsel fra kalibreret 500m model, kalibreret 50 0m og den Nationale Vandressource-model 2019. Tabellen viser i den øverste blok performance for alle søerne. I nedre blok søerne inddelt i forhold til >/< 6.

sødata		1*	2*	3*	4*
Alle obs.	ME	-2,83	-2,92	-1,85	-1,47
	MAE	3,81	3,84	3,98	3,50
	ME90%	-1,05	-1,15	-0,26	-0,12
	MAE90%	2,13	2,17	2,59	2,32
TWI > 6	ME	-2,68	-2,75	-2,83	-1,06
	MAE	3,66	3,68	4,61	3,24
	ME90%	-0,93	-1,02	-1,37	-0,19
	MAE90%	2,02	2,05	3,14	2,12
TWI < 6	ME	-3,15	-3,28	-1,50	-2,60
	MAE	4,13	4,20	3,75	4,23
	ME90%	-1,36	-1,50	-0,21	-1,33
	MAE90%	2,44	2,52	2,39	2,92

1*: DK-model HIP 100m
2*: DK-model HIP 100m med fuld 500m parameteroverførsel
3*: DK-model HIP 500m
4*: DK-model2019



Figur 16: Figuren viser de sorterede ME for sødata for hvert af de seks modeldomæner, for kalibreret 50 0m (rød) og kalibreret 100m (blå) modellerne.

1.3.2. Kvantitativ vurdering af vandførings simuleringer

Tabel 14 angiver performancestatistik for vandføringsdata for kalibreringsperioden og de to valideringsperioder, for den kalibrerede 100m model, 100m modellen med fuld 500m parametrisering, den kalibrerede 500m model og DK-model2019.

Afstrømningen er specielt påvirket af underestimeringen af nedbøren i valideringsperiode 2, hvorfor alle modeller performer væsentligt ringere.

Sammenholdes den opnåede performance for den kalibrerede 100m model (nr. 1, Tabel 14) med de opstillede kriterier, ses det at modellen overordnet opfylder kriterierne i kalibreringsperioden og valideringsperiode 1. Generelt har den kalibrerede 100m model en større andel af stationer med bedre performance end de andre modeller.

Sammenholdes resultaterne fra den kalibrerede 100m model med initial 100m modellen med fuld 500m parameteroverførsel er der primært vundet en del på vandføringsdynamikken hvor en stor del af stationerne rykkede op på screeningsniveau. Den årlige vandbalance er primært blevet bedre i valideringsperiode 1 med har også et større antal stationer på detailniveau i kalibreringsperioden. Simuleringen af sommervandbalancen og maksafstrømningen er også væsentligt forbedret i 100m kalibreringen hvor en større del af stationerne performer på overslags- eller detailniveau.

Sammenholdes resultaterne fra initial 100m modellen med fuld 500m parameteroverførsel og den kalibrerede 500m model er der i modsætning til performance på trykniveauerne ikke sket en forbedring af afstrømningen ved at ændre modelopløsningen.

Inddragelse af Q_{01} som performancekriterie er specielt i HIP4Plus i forhold til tidligere DK-modeller, som primært vurderes ud fra kriterierne beskrevet i Geovejledning 2017/1. Kriteriet tager ikke højde for oplands- eller vandløbstyper, som er defineret for andre anvendte kriterier, hvilket vil sige at alle vandløb, store som små, vurderes på baggrund af samme grænseværdier, hvorfor en langt større andel af de store vandløb vil have et højt performanceniveau og selv performer godt i valideringsperiode 2, Tabel 14.

I Tabel 14 er også vist performance for T-hændelserne for den kalibrerede 100m model og her ses det at modellen performer tilfredsstillende for 2, 5, 10 og 20 års hændelserne, dog mindre godt på 50 og 100 års hændelserne. At usikkerheden stiger med årshændelsens størrelse er forventeligt.

I Figur 17 vises den sorterede vandføringsstatistik nationalt for de kalibrerede 100m og 500m modeller. For hver statistisk størrelse vises resultater fra henholdsvis kalibrerings- og valideringsperioderne.

Sammenholdes performance på afstrømningen fra den kalibrerede 100m og kalibrerede 500m model, ses en klar forbedring af nøjagtighedsmålene i 100m kalibreringen. Vandføringsdynamikken er

markant bedre og det ses at stationernes gennemsnitlige KGE er højere i kalibreringsperioden og valideringsperiode 1, Figur 17. Sommervandbalancefejlen og maksvandføringen er også forbedret for en del stationer, primært de stationer som i den kalibrerede 500m havde de største fejl på WBEs og $Q_{01\text{-}E}$. Den årlige vandbalancefejl er den parameter som ændrer mindst når den sorterede WBE sammenlignes imellem de forskellige modeller. Generelt for valideringsperiode 2 er den kalibrerede 500m model bedre for alle fire nøjagtighedsmål, hvilket kan skyldes en større tendens til overestimering af vandføringen i forhold til 100m modellen.

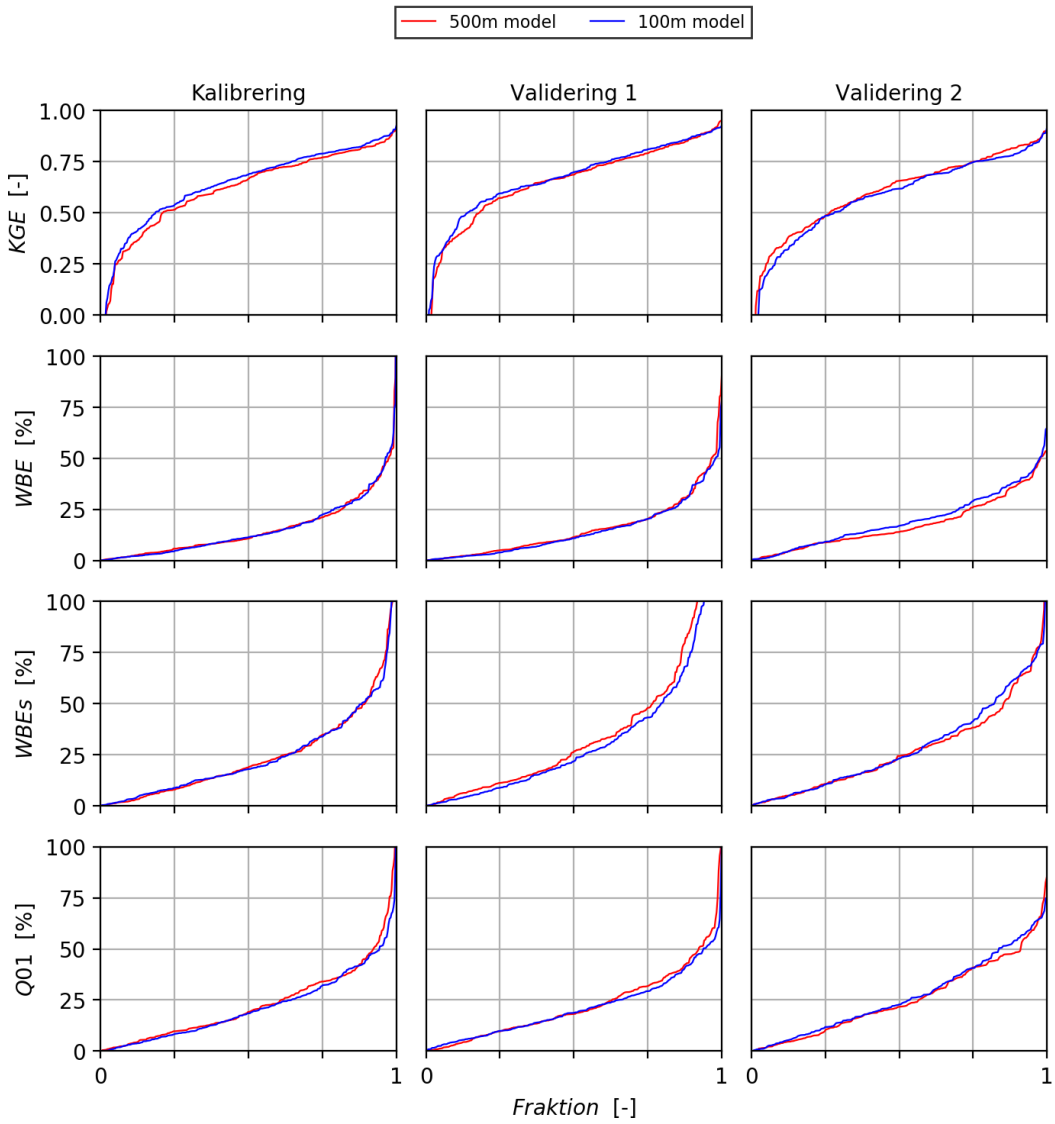
Tabel 14: Tabellen viser vandføringsperformance, KGE, WBE, WBEs, $Q_{01\text{-}E}$ og $T_{X\text{-}E}$ for vandføringsdata, for kalibreret 100m model, 100m model med fuld parameteroverførsel fra kalibreret 500m model, kalibreret 500m og den Nationale Vandressourcemodel 2019. Tabellen viser fordelingen af stationer imellem de fire performanceniveauer "Under screening", "Screening", "Overslag", " Detail" og procentdel af stationer på screeningsniveau og over.

		Kalibreringsperiode				Valideringsperiode 1				Valideringsperiode 2			
	vandføringsdata	1*	2*	3*	4*	1	2	3	4	1	2	3	4
KGE	Under screening	73	82	81	80	58	75	69	69	72	87	75	86
	Screening	51	59	55	59	55	54	48	41	44	40	35	23
	Overslag	77	74	74	60	71	68	71	64	49	42	54	57
	Detail	107	93	95	109	112	99	105	122	54	50	52	53
	Over screening	**76%**	73%	73%	74%	**80%**	**75%**	**76%**	**77%**	67%	60%	65%	61%
WBE	Under screening	85	79	73	87	62	64	66	73	108	111	93	90
	Screening	59	67	63	67	65	65	66	67	34	33	40	55
	Overslag	52	56	61	44	51	54	50	44	25	23	29	26
	Detail	112	106	108	110	118	113	111	112	52	52	54	48
	Over screening	72%	74%	**76%**	72%	**79%**	**78%**	**77%**	**75%**	51%	49%	57%	59%
WBEs	Under screening	61	59	56	60	85	96	93	73	63	56	57	57
	Screening	68	84	91	94	72	70	81	95	69	65	70	72
	Overslag	74	52	45	62	47	45	38	48	28	31	34	39
	Detail	105	113	113	92	92	85	81	80	59	67	55	51
	Over screening	**80%**	**81%**	**82%**	**81%**	71%	68%	68%	**75%**	71%	74%	74%	74%
$Q_{01\text{-}E}$	Under screening	18	23	23	20	19	21	22	16	36	37	23	27
	Screening	65	76	73	64	52	61	64	61	47	55	61	54
	Overslag	93	88	77	85	104	103	85	87	68	65	55	70
	Detail	132	121	132	139	120	111	122	132	68	62	77	68
	Over screening	**94%**	**93%**	**92%**	**94%**	**94%**	**93%**	**92%**	**95%**	**84%**	**83%**	**89%**	**88%**

	T-hændelser	T_2	T_5	T_{10}	T_{20}	T_{50}	T_{100}
$T_{X\text{-}E}$	Under screening	30	21	24	37	62	72
	Screening	43	40	47	44	38	36
	Overslag	62	59	52	51	41	35
	Detail	51	66	63	54	45	43
	Over screening	**84%**	**89%**	**87%**	**80%**	67%	61%

NB: *(Performance for T-hændelser er kun medtaget for den kalibrerede 100m model. Performance ræpræsentere 186 stationer fra hele den historiske periode.)*

1*: DK-model HIP 100m
2*: DK-model HIP 100m med fuld 500m parameteroverførsel.
3*: DK-model HIP 500m
4*: DK-model2019



Figur 17: Figuren viser vandføringsperformance for KGE, WBE, WBEs og Q_{01}, for kalibreret 500m (rød) og kalibreret 100m (blå) modellerne.

1.3.3. Kvalitativ vurdering af rummelige residualer

I dette afsnit præsenteres kun resultater fra den kalibrerede 100m model. Den rummelige fordeling af middelfejl på trykniveauerne er illustreret i Figur 18, Figur 19 og Figur 20 for de terrænnære observationer, og i Figur 22, Figur 23 og Figur 24 for de dybe observationer. For henholdsvis de terrænnære og dybe observationer vises den rummelige fordeling i kalibreringsperioden og de to valideringsperioder.

Den rummelige fordeling af vandføringsperformance vises i Figur 25 til Figur 32, for de fire nøjagtighedsmål KGE, WBE, WBEs og $Q_{01\text{-}E}$ vises resultater for kalibreringsperioden og valideringsperiode 1.

For T-hændelser (T_{X-E}) vises performance for hele den historiske periode for 10 og 100 års hændelser, Figur 31 og Figur 32.

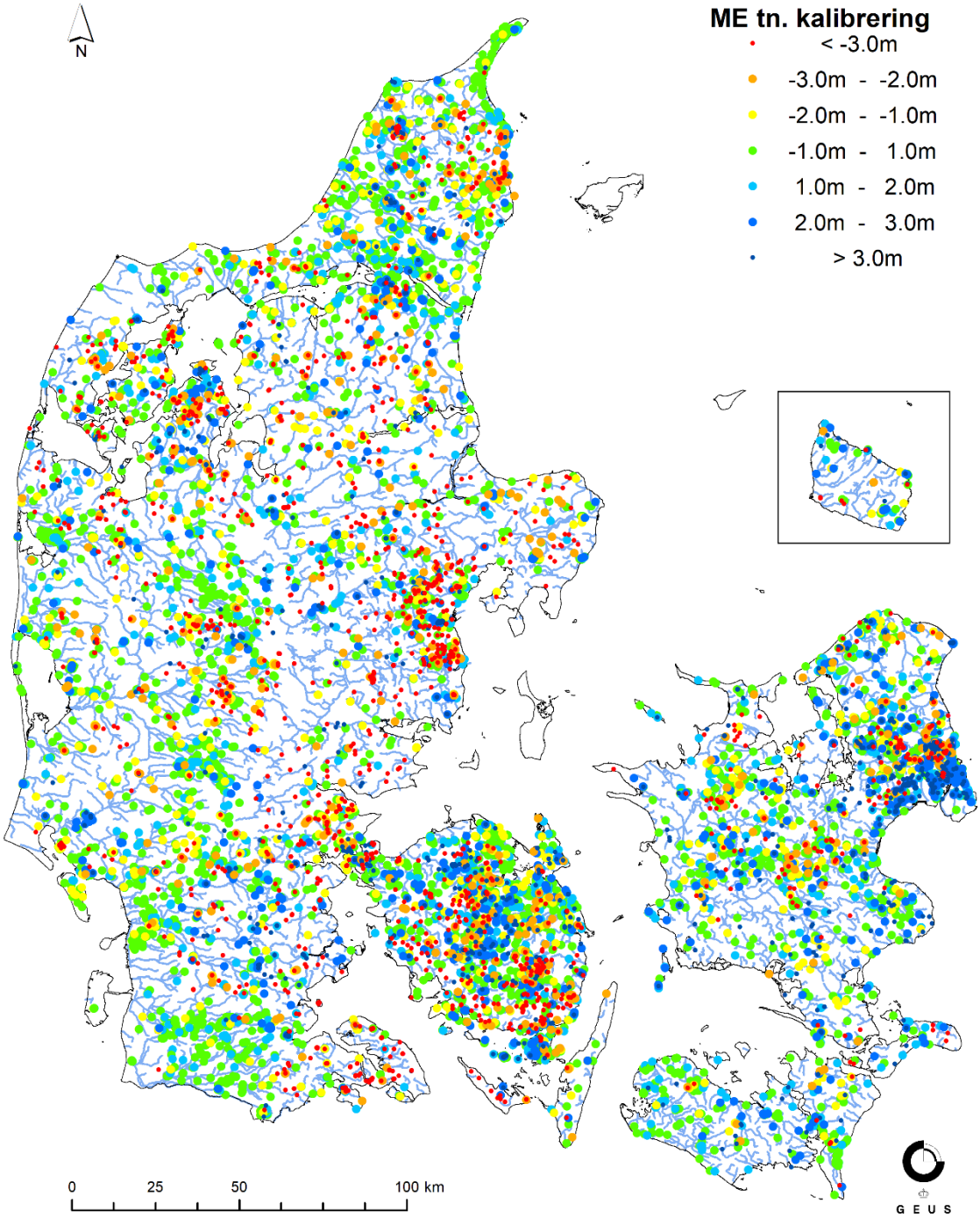
Trykniveau

For det terrænnære grundvand, Figur 18, Figur 19 og Figur 20, er det generelle billede at ME pr. boring i største delen af landet er imellem ± 2m, hvilket er acceptabelt for de terrænnære observationer. Generelt virker fordelingen af ME rimelig ensartet for kalibreringsperioden og valideringsperiode 1 for ME mindre end 3 m, med få områder hvor større ME dominere. Som det også fremgår af diagrammerne med sorteret ME, , så er der en tendens til overestimering af trykniveauerne på Sjælland og øerne (få røde boringer), hvorimod boringerne der underestimere trykniveauerne har større fejl end boringerne som overestimere (mange røde boringer, få mørkeblå boringer). For valideringsperiode 2 ser det ud til at trykniveauet underestimeres i et større antal boringer dette kan skyldes underestimeringen af nedbøren i denne periode som også var antydet af resultaterne fra .

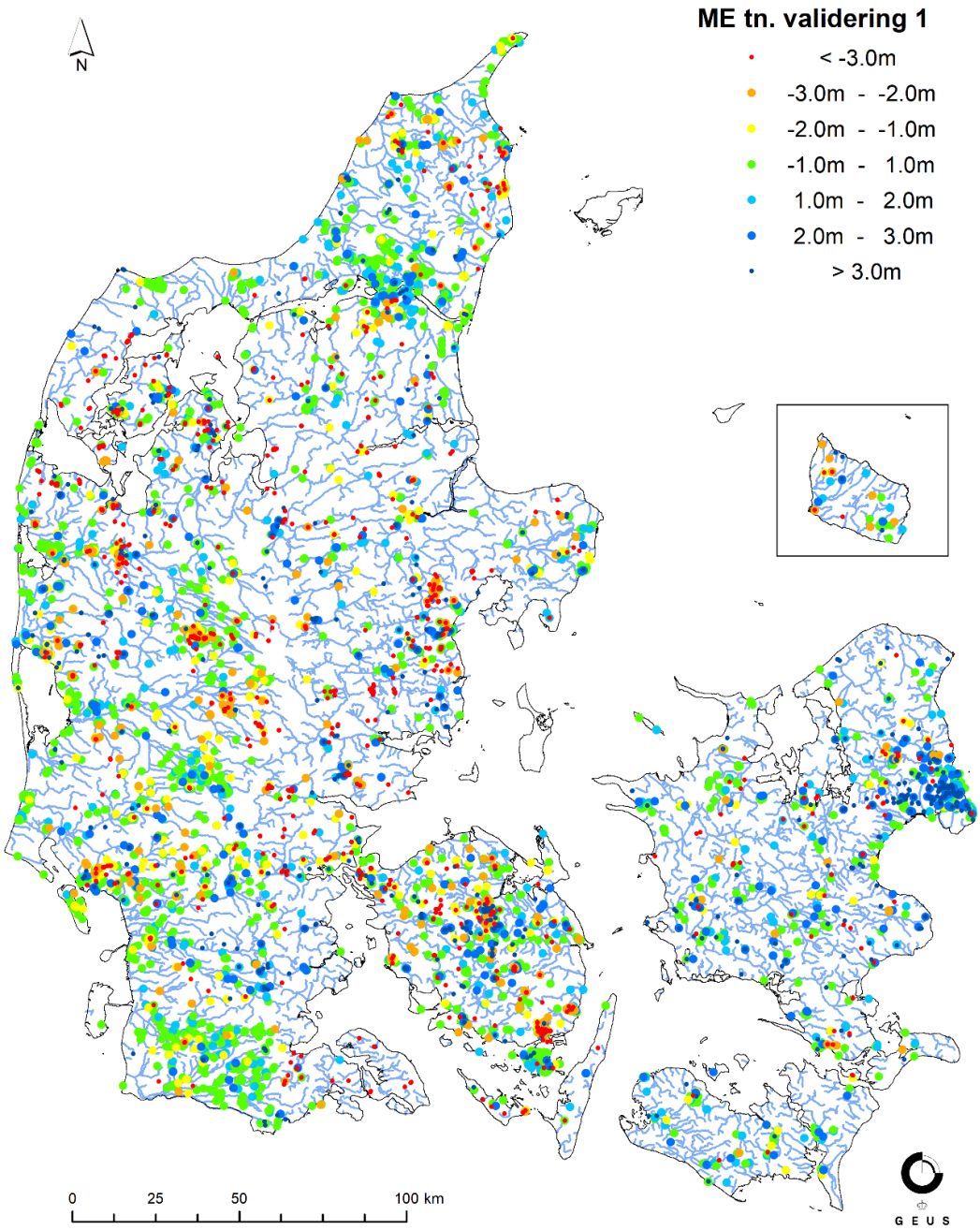
For søerne, Figur 21 , er det generelle billede at ME pr. sø i største delen af landet er imellem ± 2m, hvilket er acceptabelt. Generelt er der en klar tendens til underestimering af trykniveauerne i søerne, hvilket er forventeligt da søernes trykniveau ligger i terræn. At dette ikke er tilfældet på Sjælland skyldes formodentligt at grundvandet her generelt simulere trykniveauerne højt, se Figur 18.

For det dybe grundvand, Figur 22, Figur 23 og Figur 24, er det generelle billede at ME pr. boring i største delen af landet er imellem ± 5m, hvilket er acceptabelt for dybere observationer. Der ses tydelige rummelige mønstre i fordelingen af ME, blandt andet ses det at nogle områder har markant mindre middelfejl ± 1m, som smeltevandsletterne vest for israndslinjen i Jylland, den hævede Litorinaflade og kystaflejringerne i Nordjylland og meget flade og lavtliggende landområder som Lolland og Falster. Der er dog områder med udpræget dominans af større middelfejl større end ± 5m, i en del af disse områder har ME med samme fortegn tendens til at klumpe sammen i større områder, som det f.eks. ses i Københavnsområdet hvor modellen overvejende simulere overestimere de dybe trykniveauer og omvendt i store dele af Nordjylland sydvest for Frederikshavn ser vi en overvejende underestimering af de dybe trykniveauer. Igennem hele den historiske periode er mønstrene i de dybe trykniveauer, i forhold til over og underestimering, ensartede og i samme størrelsesorden.

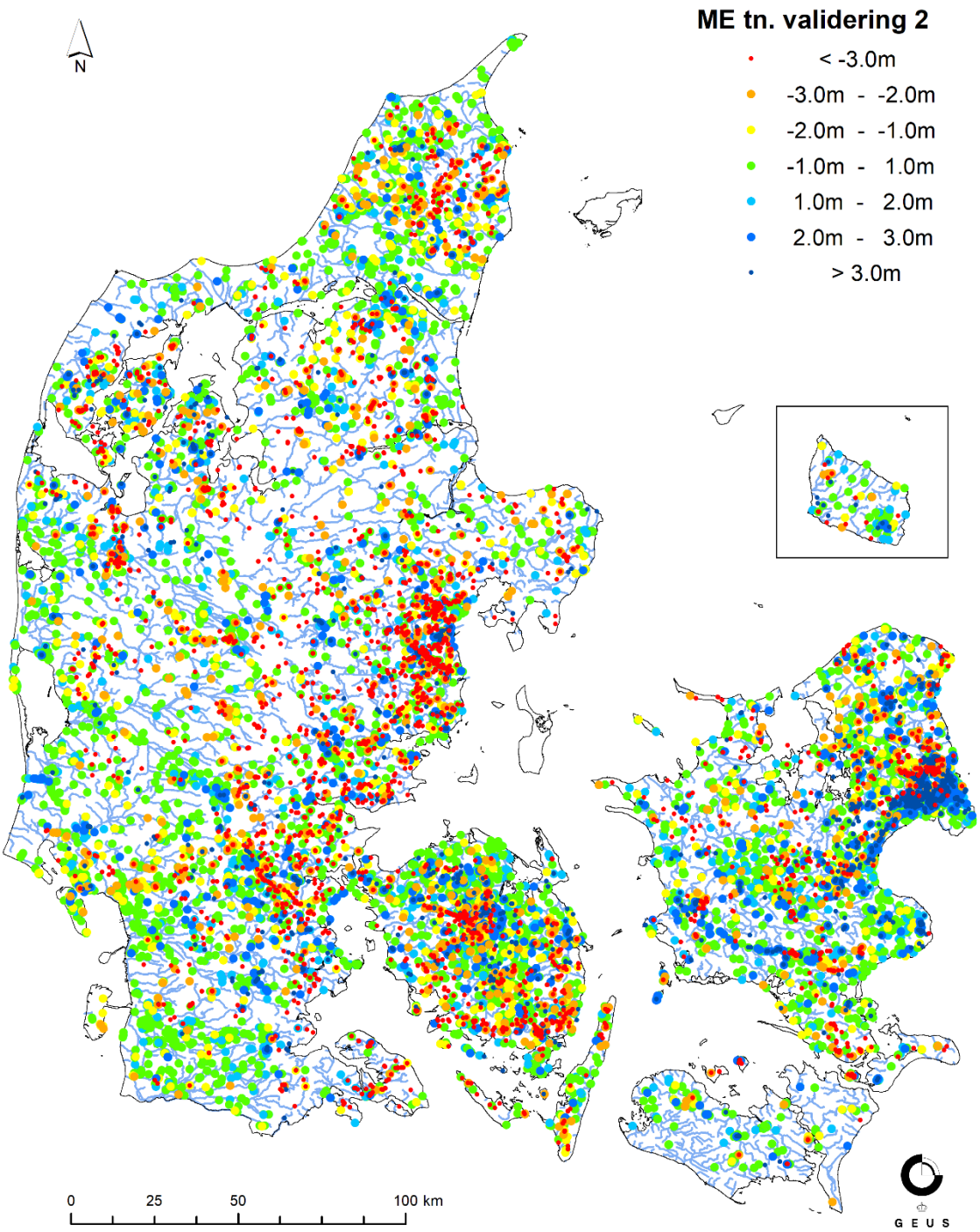
Områder som viser betydelige ME med varierende fortegn er vanskelige at forbedre ved kalibrering da den relativt simple parametrisering baseret på store hydrogeologiske enheder ikke understøtter dette, som det eksempelvis ses på Fyn og syd for Århus. Overordnet er den rummelige fordeling af residualerne meget lig resultaterne fra DK-model2019, hvilket er forventeligt da modellerne anvender den samme geologiske model (FOHM).



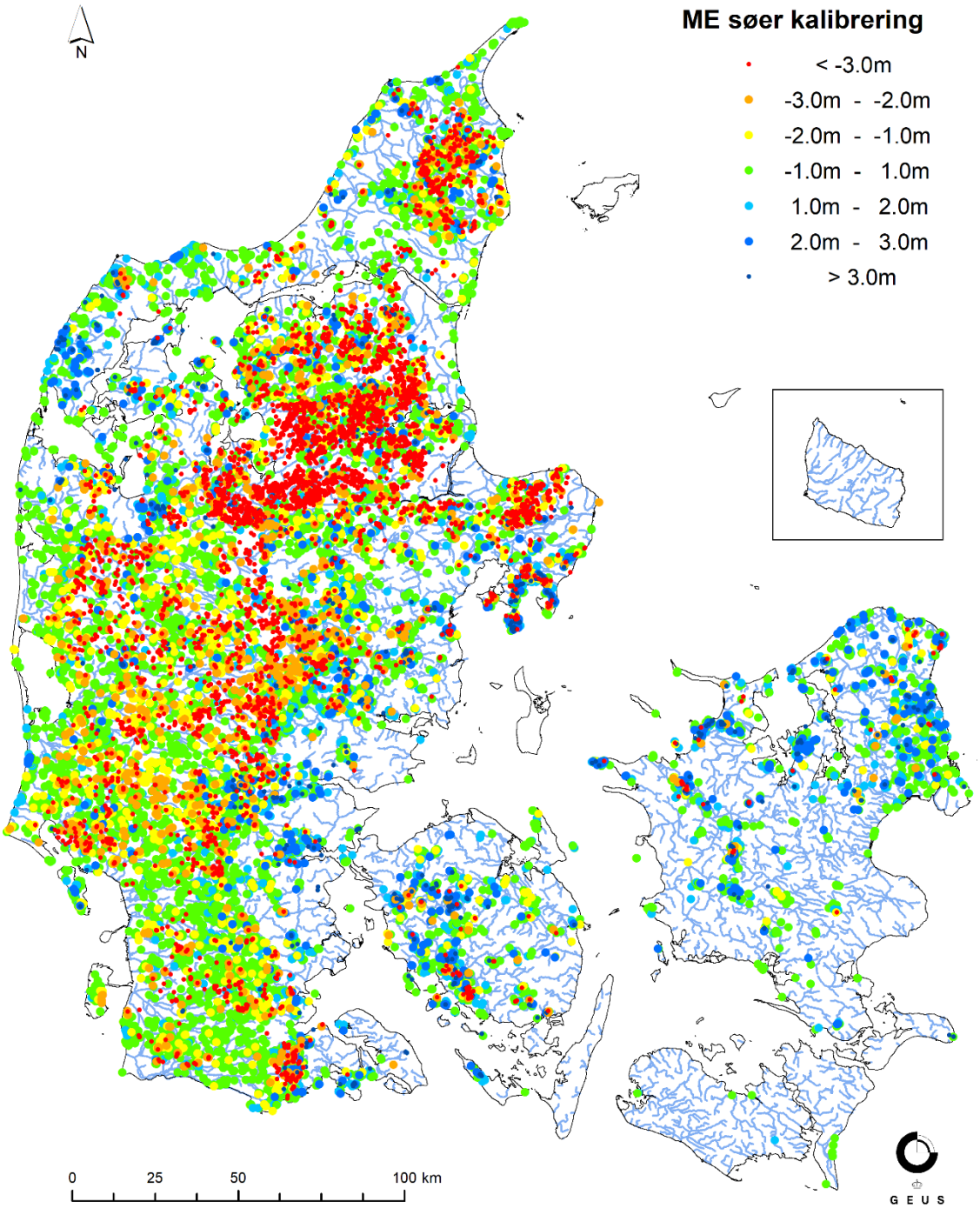
Figur 18: Rumlig fordeling og størrelse af middelfejl (ME) for alle observerede terrænnære trykniveauer i kalibrerings-perioden 2000-2010. Symbolrækkefølgen bevæger sig fra grøn (bagerst) til henholdsvis rød og mørkeblå (forrest). Områder med større afvigelser bliver således fremhævet på figuren.



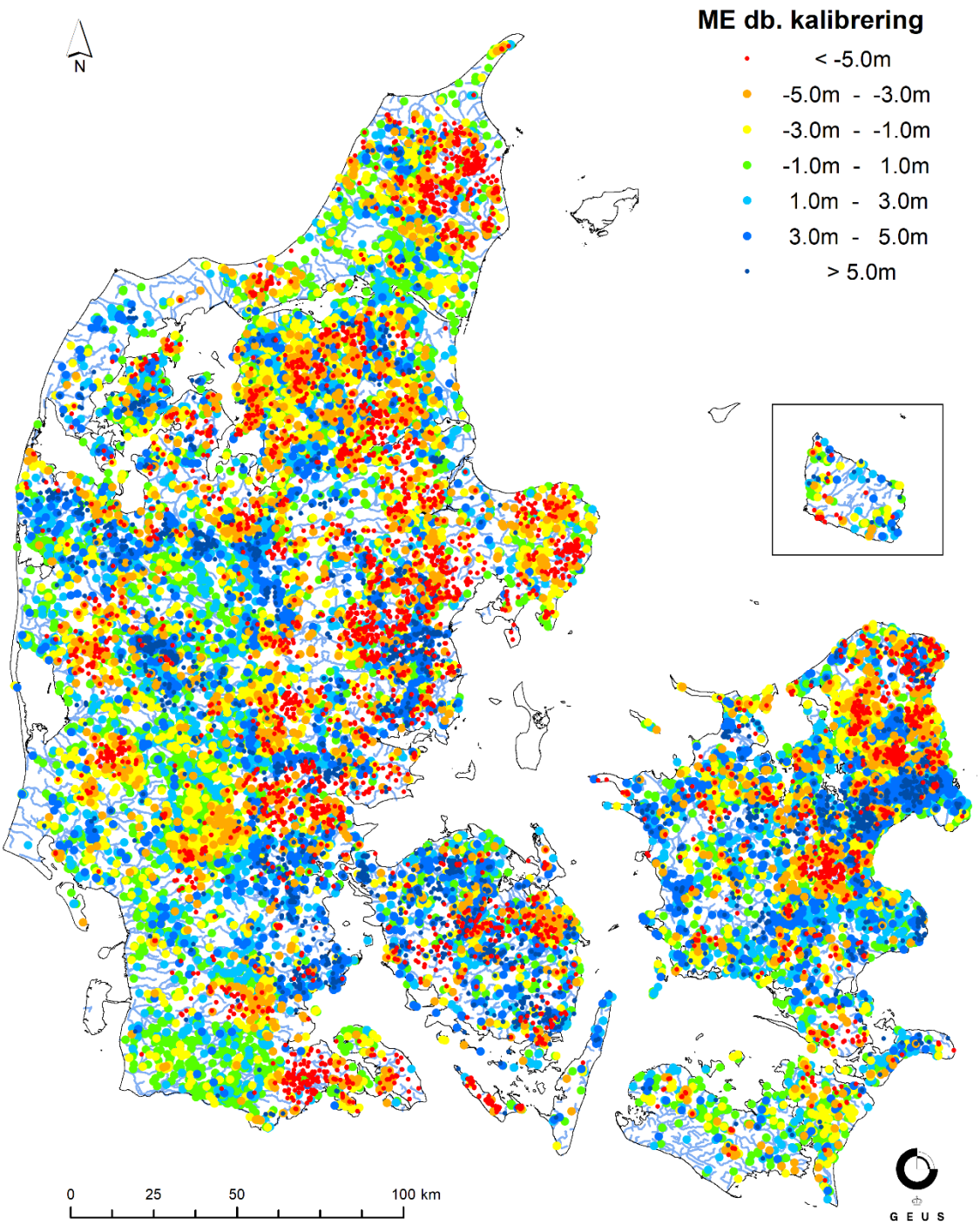
Figur 19: Rumlig fordeling og størrelse af middelfejl (ME) for alle observerede terrænnære trykniveauer i valideringsperioden 1990-1999. Symbolrækkefølgen bevæger sig fra grøn (bagerst) til henholdsvis rød og mørkeblå (forrest). Områder med større afvigelser bliver således fremhævet på figuren.



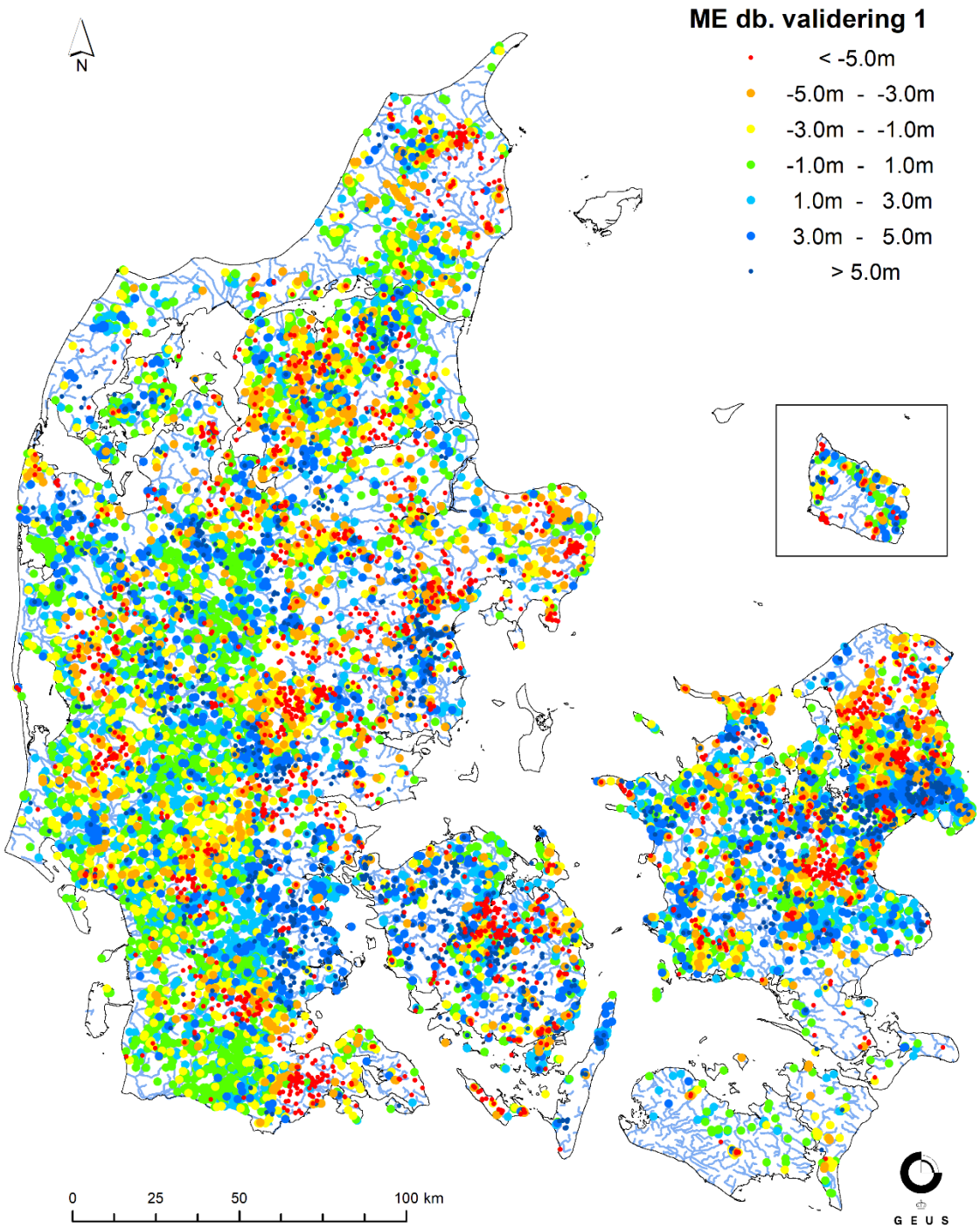
Figur 20: Rumlig fordeling og størrelse af middelfejl (ME) for alle observerede terrænnære trykniveauer i valideringsperioden 2011-2019. Symbolrækkefølgen bevæger sig fra grøn (bagerst) til henholdsvis rød og mørkeblå (forrest). Områder med større afvigelser bliver således fremhævet på figuren. Som del af HIP4Plus projektet har der været fokus på udvidelsen af specielt terrænnære pejledata, hvor hovedparten af nye observationer er fra valideringsperiode 2.



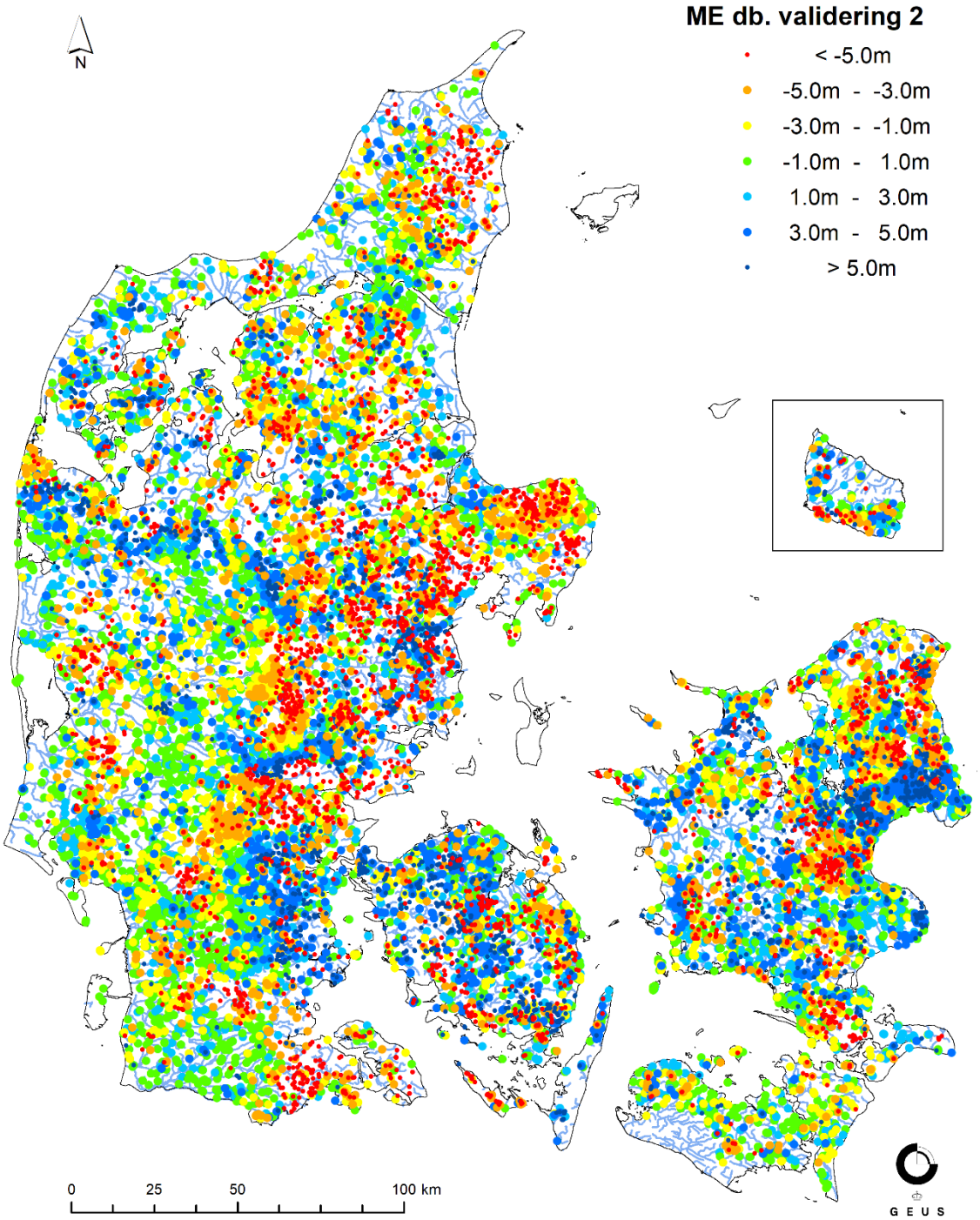
Figur 21: Rumlig fordeling og størrelse af middelfejl (ME) for alle søer i kalibreringsperioden 2000-2010. Symbolrækkefølgen bevæger sig fra grøn (bagerst) til henholdsvis rød og mørkeblå (forrest). Områder med større afvigelser bliver således fremhævet på figuren.



Figur 22: Rumlig fordeling og størrelse af middelfejl (ME) for alle observerede dybe trykniveauer i kalibreringsperioden 2000-2010. Symbolrækkefølgen bevæger sig fra grøn (bagerst) til henholdsvis rød og mørkeblå (forrest). Områder med større afvigelser bliver således fremhævet på figuren.



Figur 23: Rumlig fordeling og størrelse af middelfejl (ME) for alle observerede dybe trykniveauer i valideringsperioden 1990-1999. Symbolrækkefølgen bevæger sig fra grøn (bagerst) til henholdsvis rød og mørkeblå (forrest).



Figur 24: Rumlig fordeling og størrelse af middelfejl (ME) for alle observerede dybe trykniveauer i valideringsperioden 2011-2019. Symbolrækkefølgen bevæger sig fra grøn (bagerst) til henholdsvis rød og mørkeblå (forrest).

Vandføring

Den rummelige fordeling af KGE for kalibreringsperioden og valideringsperiode 1 er illustreret i henholdsvis Figur 25 og Figur 26. Generelt opnås gode simuleringsresultater på vandføringsdynamikken i størstedelen af landet. I områder som Nordsjælland og Midtjylland ses en mere varierende performance med jævnt spredte stationer på alle performanceniveauer. Dog performer modellen særligt svagt på det sydlige Sjælland og øerne.

Generelt performer store stationer tilfredsstillende, mens små stationer har vanskeligt ved at simulere vandføringsdynamikken, dette ses tydeligt i Jylland hvor langt størstedelen af stationerne er karakteriseret ved samme oplandstype og derfor har samme grænseværdier i forhold til inddeling i performanceniveauer.

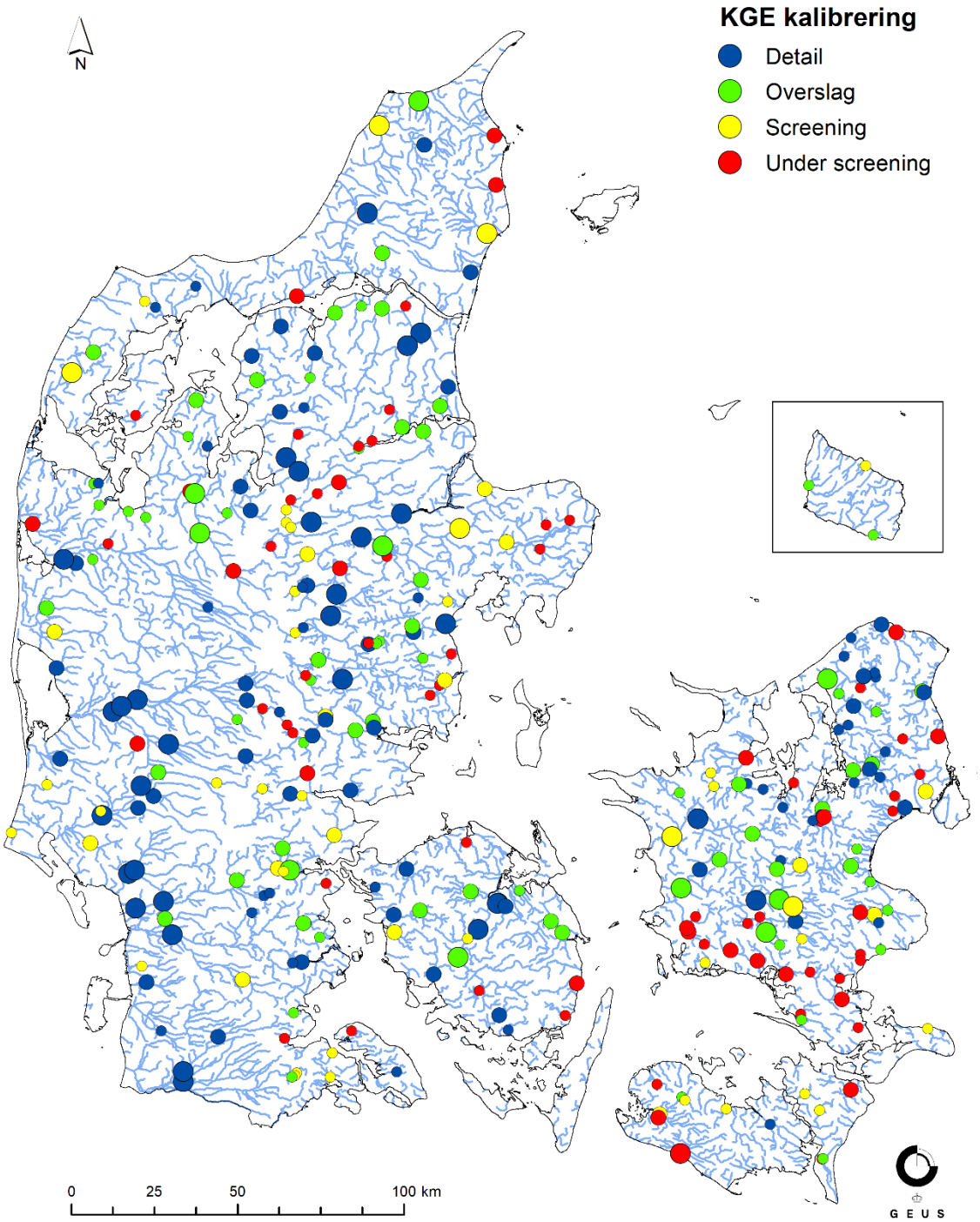
Den rummelige fordeling af WBE for kalibreringsperioden og valideringsperiode 1 er illustreret i henholdsvis Figur 27 og Figur 28. Generelt opnås gode simuleringsresultater på vandbalancefejlen i størstedelen af landet. I områder som Nordsjælland og Midtjylland ses en mere varierende performance med jævnt spredte stationer på alle performanceniveauer. Dog performer modellen særligt svagt på det sydlige Sjælland og Midtjylland.

Generelt performer mindre stationer tilfredsstillende, mens store stationer har vanskeligt ved at simulere den årlig vandbalance, dette har ikke kun været tilfældet i HIP4Plus projektet men også et mønster der genfindes i DK-model2019. Det kan diskuteres om kriterierne jævnfør Geovejledning 2017/1, for de store vandløb, er for hårde i forhold til de mindre vandløb.

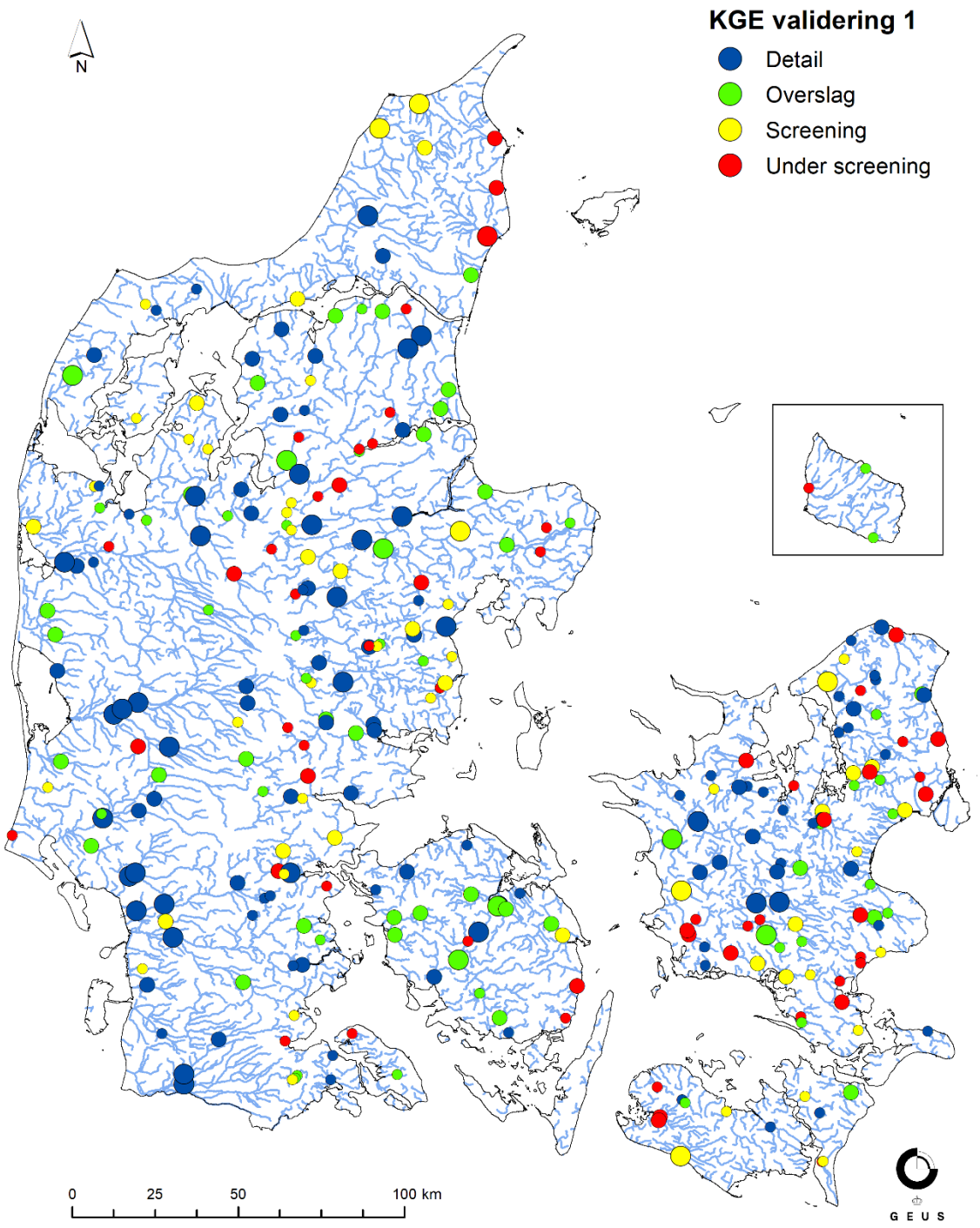
Den rummelige fordeling af $Q_{01\text{-}E}$ for kalibreringsperioden og valideringsperiode 1 er illustreret i henholdsvis Figur 29 og Figur 30. Generelt opnås gode simuleringsresultater på maksvandføring i størstedelen af landet. I områder som Nordsjælland og Midtjylland ses en mere varierende performance med jævnt spredte stationer på alle performanceniveauer. Dog performer modellen særligt svagt på det sydlige Sjælland og Øerne. Generelt performer både store og små stationer tilfredsstillende.

Sammenholdes alle resultater fra kalibreringsperioden og valideringsperiode 1 er der en overordnet tendens til at modellens rummelig fordeling af residualerne er mere jævn for valideringsperioden i forhold til kalibreringsperioden. Problemer med underestimeringen af nedbøren vides allerede at starte omkring år 2008 hvilket kan have indflydelse på performance i denne periode.

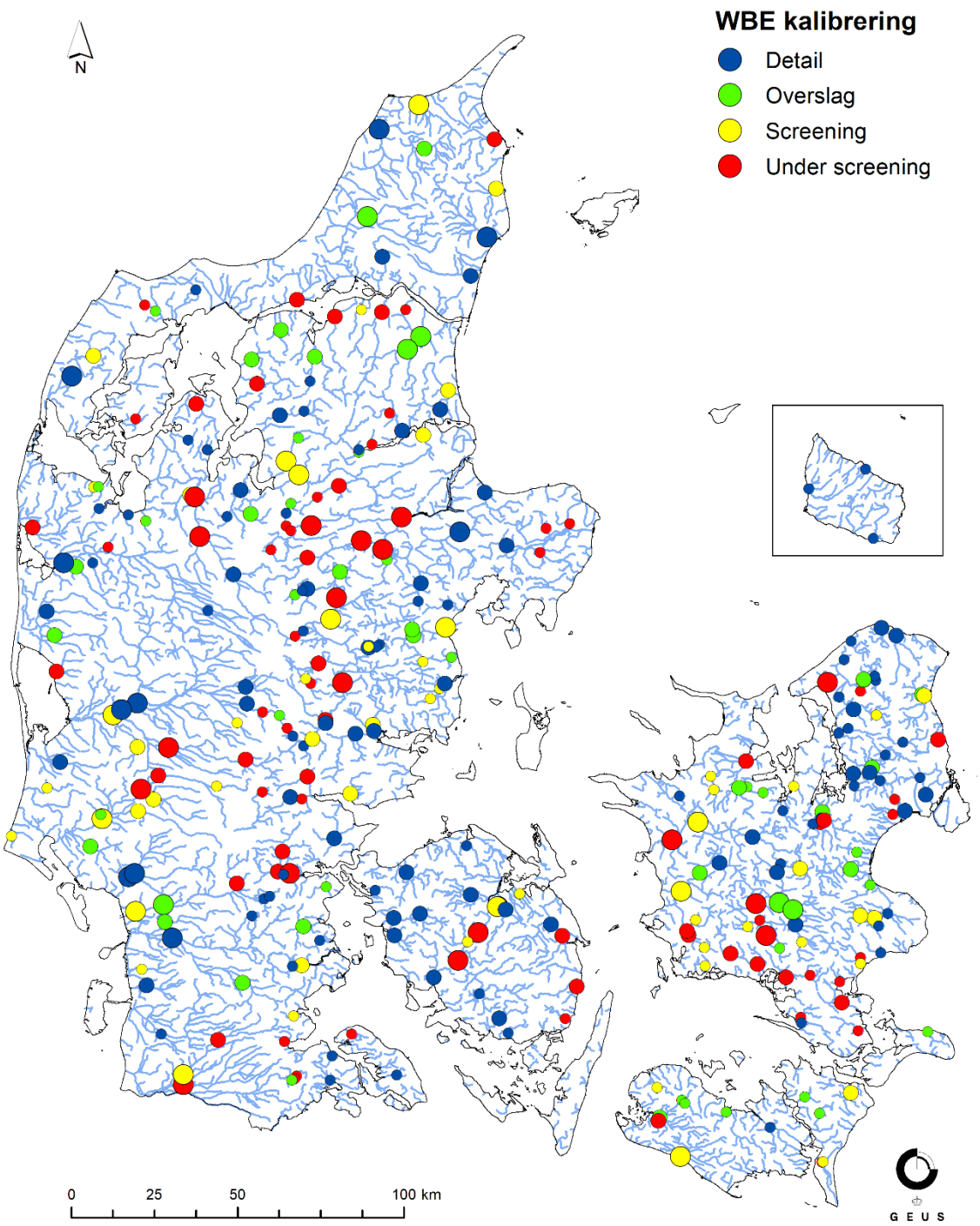
Den rummelige fordeling for $T_{10\text{-}E}$ og $T_{100\text{-}E}$ er illustreret i henholdsvis Figur 31 og Figur 32. Generelt opnås gode simuleringsresultater på T-hændelserne i størstedelen af landet med jævnt spredte stationer på alle performanceniveauer. Dog bliver usikkerheden større for 50 og 100-årshændelserne hvor der især på Sjælland er en tendens til underestimering, Figur 32. Overordnet performer både store og små stationer tilfredsstillende.



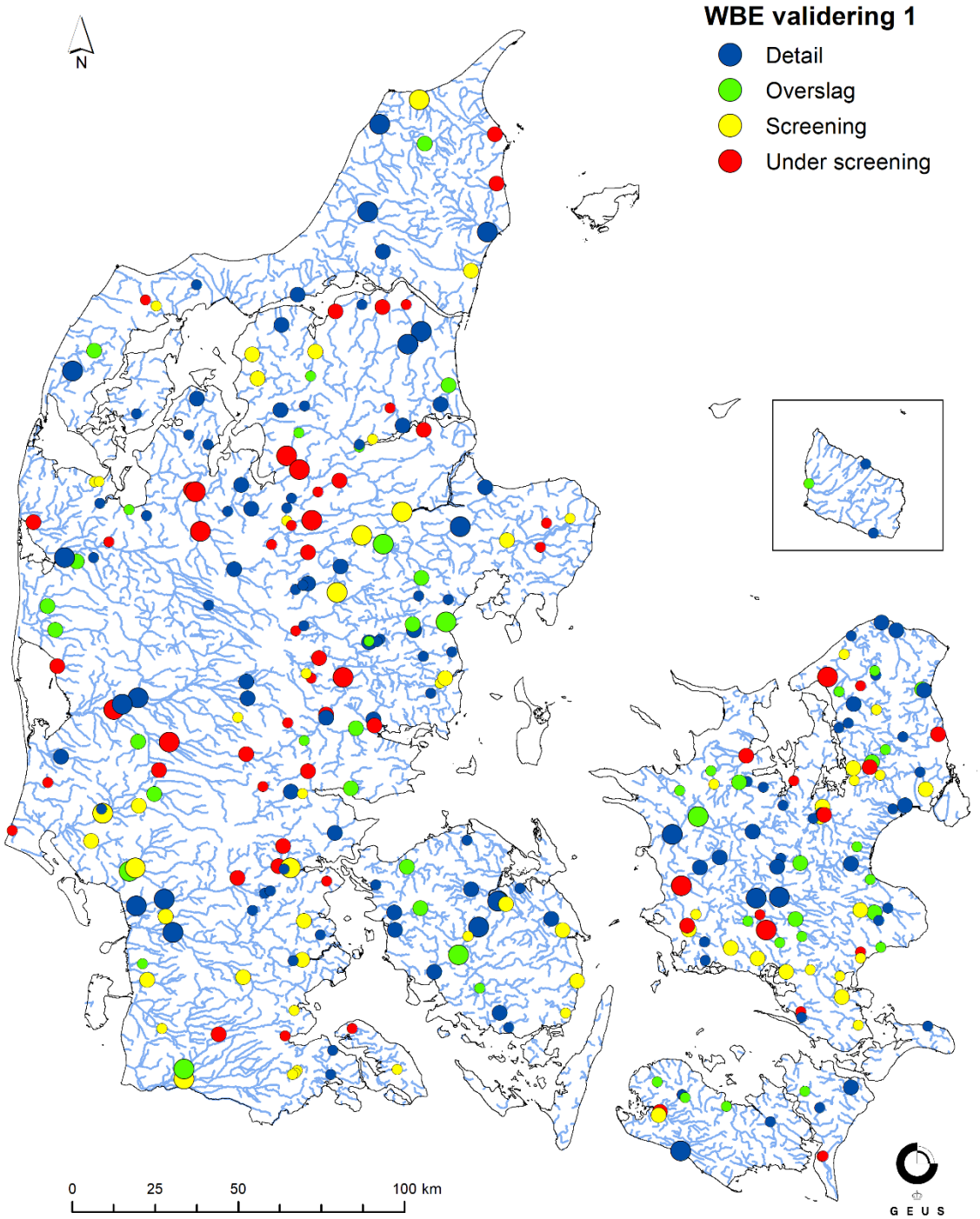
Figur 25: Rumlig fordeling af KGE nøjagtighedsniveauer for alle vandføringsstationer i kalibreringsperioden 2000-2010. Cirklernes størrelse angiver oplands-størrelsen, små cirkler < 100 km2, mellem cirkler mellem 100-200 km2 og store cirkler > 200 km2.



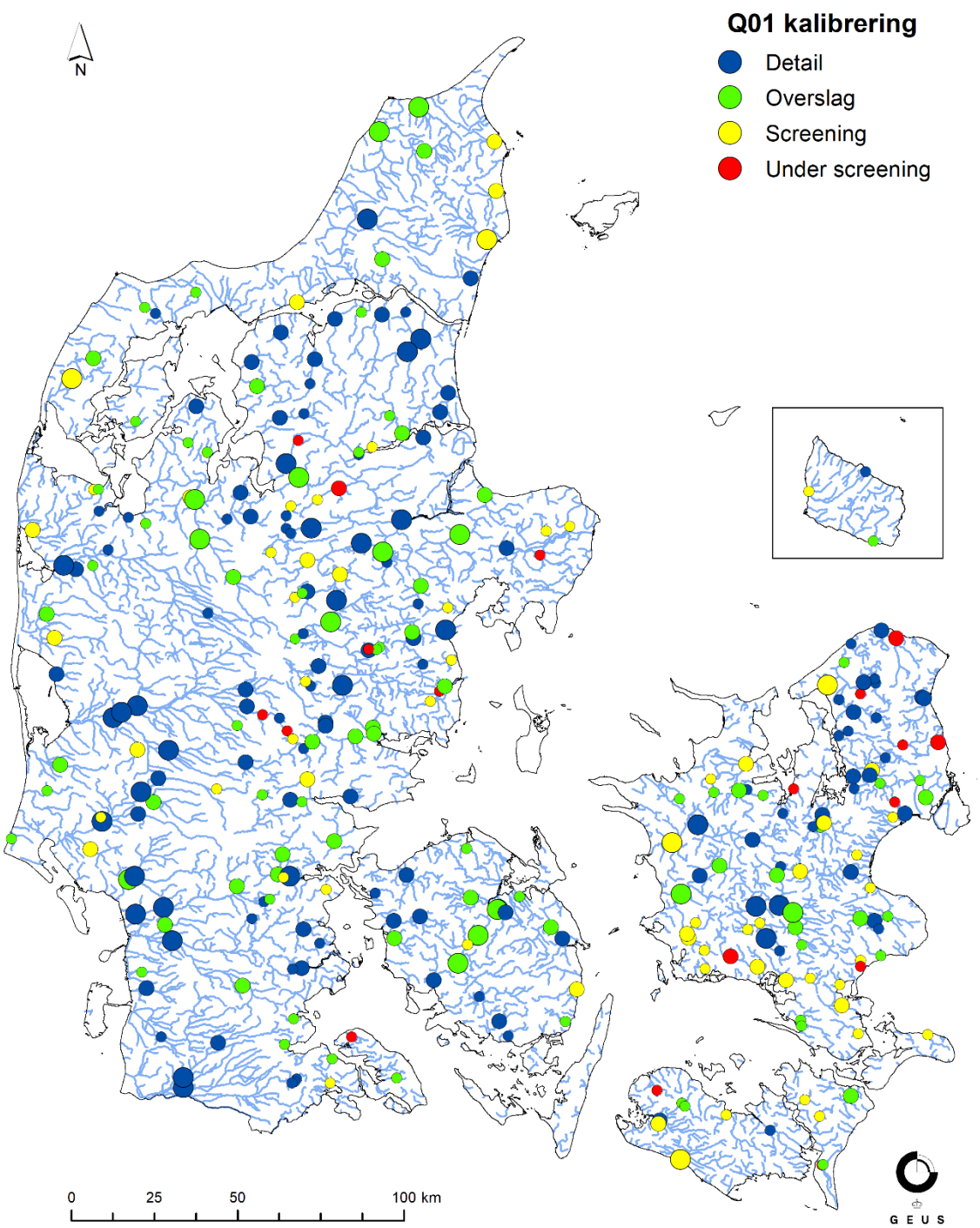
Figur 26: Rumlig fordeling af KGE nøjagtighedsniveauer for alle vandføringsstationer i valideringsperioden 1990-1999. Cirklernes størrelse angiver oplands-størrelsen, små cirkler < 100 km², mellem cirkler mellem 100-200 km² og store cirkler > 200 km².



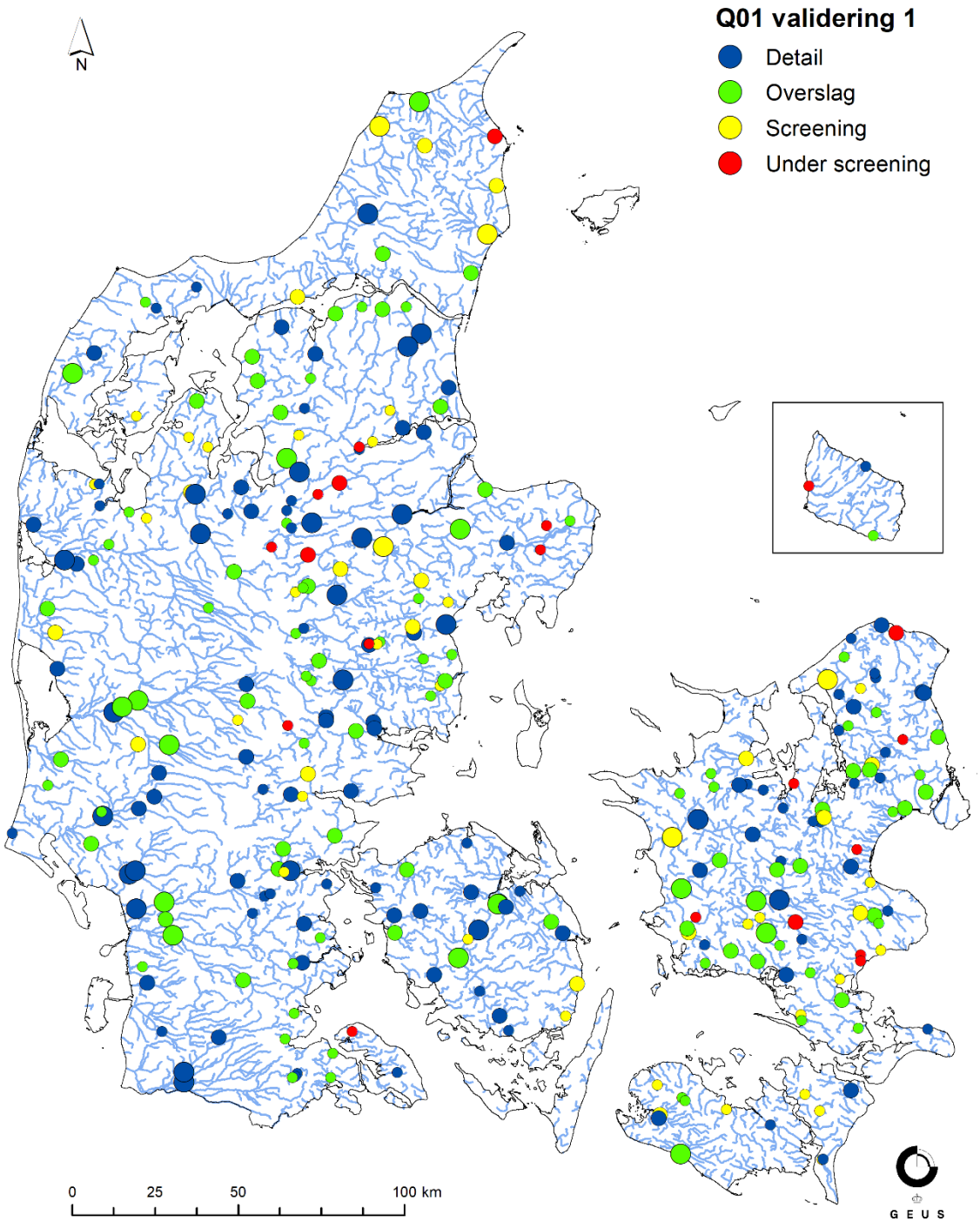
Figur 27: Rumlig fordeling af WBE nøjagtighedsniveauer for alle vandføringsstationer i kalibreringsperioden 2000-2010. Cirklernes størrelse angiver oplands-størrelsen, små cirkler < 100 km², mellem cirkler mellem 100-200 km² og store cirkler > 200 km².



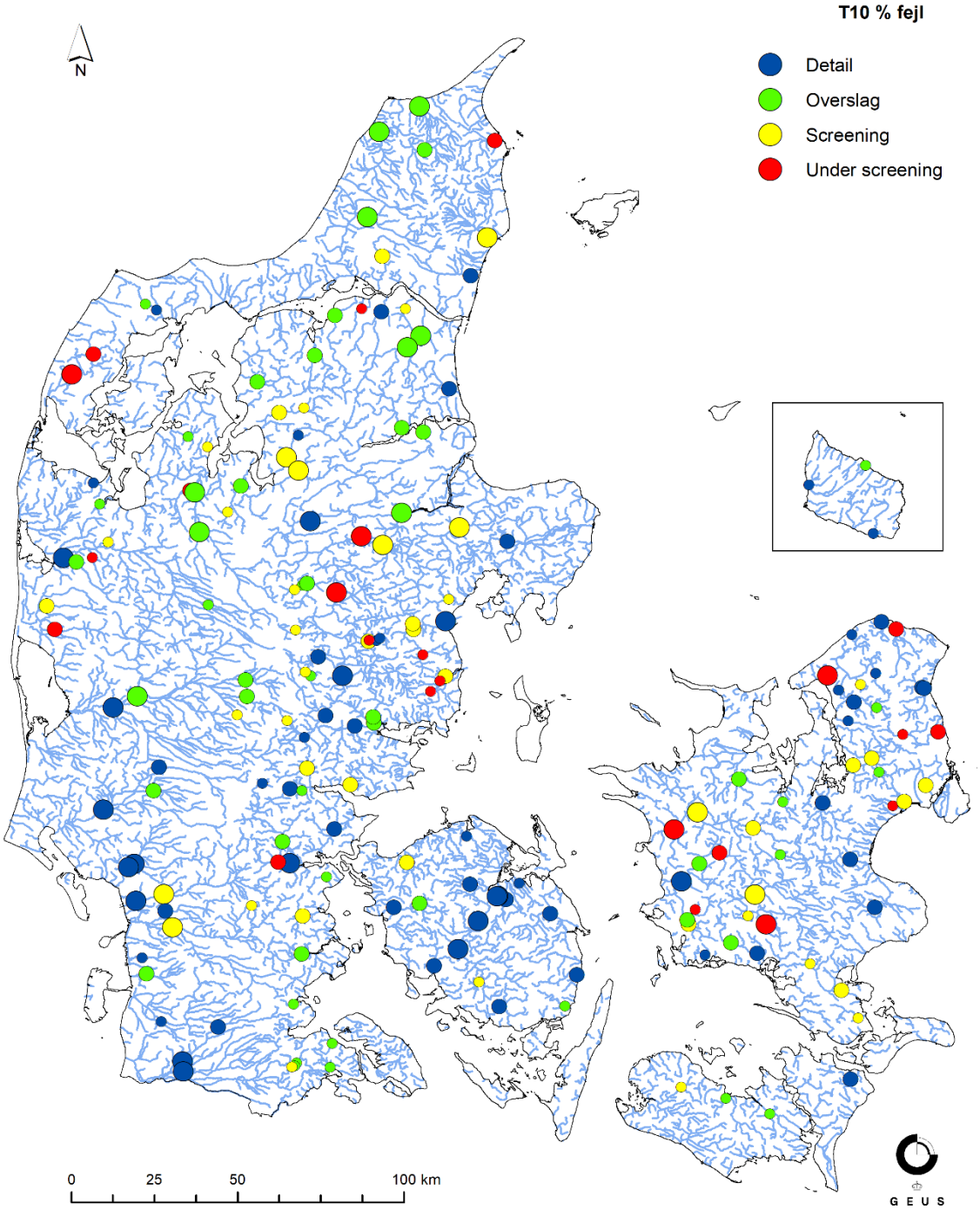
Figur 28: Rumlig fordeling af WBE nøjagtighedsniveauer for alle vandføringsstationer i valideringsperioden 1990-1999. Cirklernes størrelse angiver oplands-størrelsen, små cirkler < 100 km², mellem cirkler mellem 100-200 km² og store cirkler > 200 km².



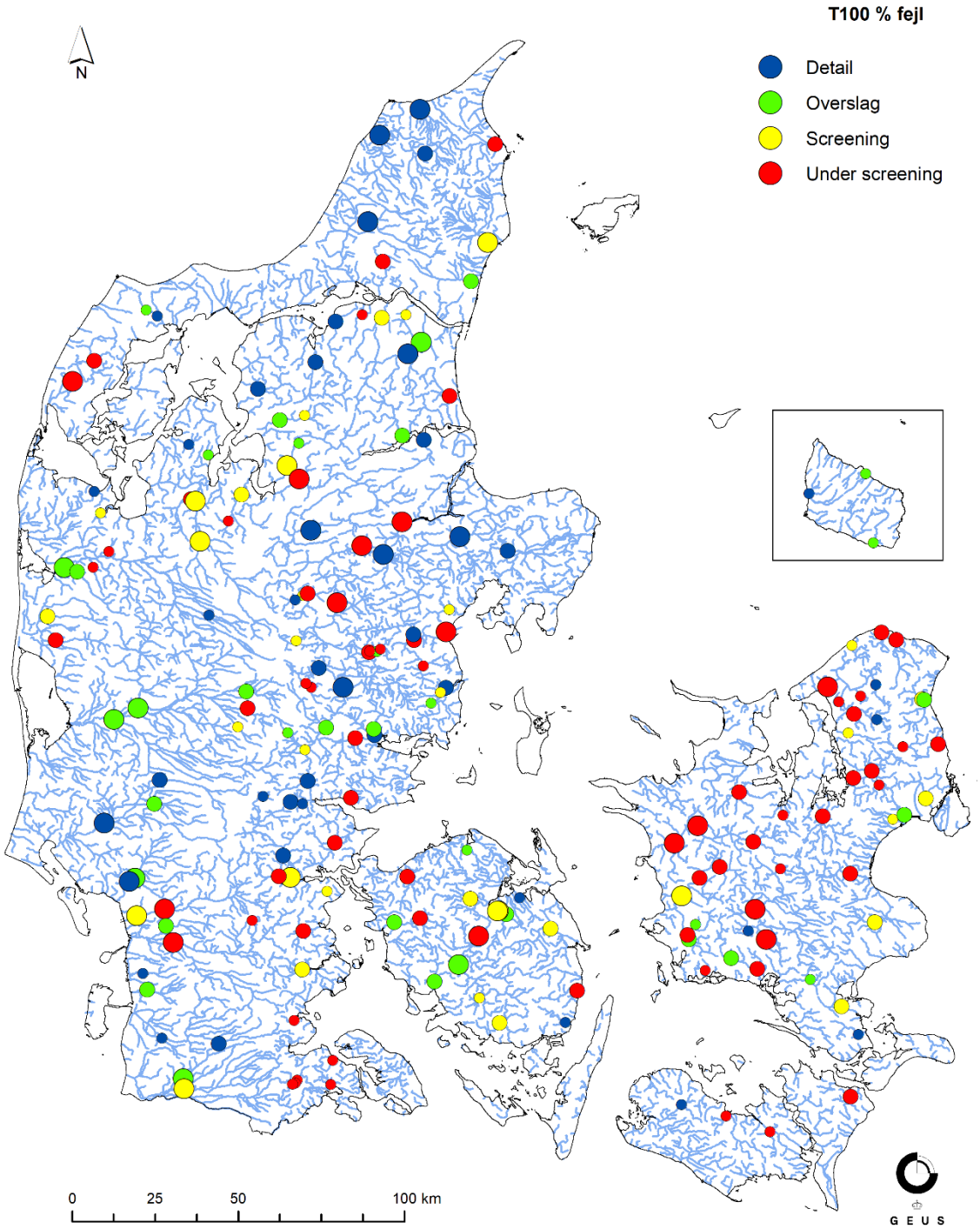
Figur 29: Rumlig fordeling af $Q_{01\text{-}E}$ nøjagtighedsniveauer for alle vandføringsstationer i kalibreringsperioden 2000-2010. Cirklernes størrelse angiver oplands-størrelsen, små cirkler < 100 km², mellem cirkler mellem 100-200 km² og store cirkler > 200 km².



Figur 30: Rumlig fordeling af $Q_{01\text{-}E}$ nøjagtighedsniveauer for alle vandføringsstationer i valideringsperioden 1990-1999. Cirklernes størrelse angiver oplands-størrelsen, små cirkler < 100 km², mellem cirkler mellem 100-200 km² og store cirkler > 200 km².



Figur 31: Rumlig fordeling af T_{10} procent fejl nøjagtighedsniveauer for 186 vandføringsstationer i perioden 1990-2019. Cirklernes størrelse angiver oplands-størrelsen, små cirkler < 100 km^2, mellem cirkler mellem 100-200 km^2 og store cirkler > 200 km^2.



Figur 32: Rumlig fordeling af T_{100} procent fejl nøjagtighedsniveauer for 186 vandføringsstationer i perioden 1990-2019. Cirklernes størrelse angiver oplands-størrelsen, små cirkler < 100 km², mellem cirkler mellem 100-200 km² og store cirkler > 200 km².

1.3.4. Vandbalance udtræk

I Tabel 16 nedenfor vises kernekomponenter fra vandbalanceudtrækket fra både 100m og 500m modellen. Vandbalancen er trækket ud for perioden 1990-2019. Forskellen i gridstørrelse har kun lille effekt på nogle af komponenterne i vandbalancen og overordnet viser resultaterne at begge modeller har en fornuftig vandbalance.

Tabel 15: Vandbalance udtræk 1990-2019, DK-model HIP 100m- og 500m

Modelområde	Nedbør [mm/år]	Fordampning [mm/år]	Baseflow [mm/år]	OL til Vandløb [mm/år]	Dræn til Vandløb [mm/år]	Nettonedbør (Nedbør - fordampning) [mm/år]	Indvinding [mm/år]	Indvinding [mio. m3/år]	Markvanding [mm/år]	Markvanding [mio. m3/år]	Nettonedbør + Markvanding - Afstrømning til vandløb - Indvinding [mm/år]	Areal [km2]
DK1 500m	730	524	57	9	101	206	23	164	0	0	16	7195
DK1 100m	730	533	33	8	118	197	22	159	0	0	16	7193
DK2 500m	712	554	27	8	108	159	5	10	0	0	11	2033
DK2 100m	712	563	15	6	111	149	5	10	0	0	13	2035
DK3 500m	778	523	72	9	134	255	10	36	0	0	30	3481
DK3 100m	778	529	68	12	127	249	11	38	0	0	31	3483
DK4 500m	969	527	149	16	226	442	17	134	7	58	42	7907
DK4 100m	969	529	162	23	204	439	18	138	8	65	41	7909
DK5 500m	903	513	179	20	168	391	15	178	6	72	14	11551
DK5 100m	903	516	170	36	159	387	16	186	7	81	12	11546
DK6 500m	876	517	124	18	158	358	11	106	2	19	49	9943
DK6 100m	876	521	104	27	163	355	11	106	2	21	52	9946
DK7 100m	778	446	4	4	256	332	11	7	0	0	56	589

1.4. Anvendelse af 100m model til modelberegninger (1990 - 2019)

Med den kalibrerede og validerede model er der gennemført simuleringer for 1990 - 2019 med daglige værdier for vandindhold i rodzonen, dybde til terrænnært grundvand og afstrømning. Efterfølgende er statistikker processeret.

Samlet set opfylder 100m model nøjagtighedskrav på landsplan, men der er områder hvor afvigelser mellem model og målinger ikke kan opfylde krav til en screeningsmodel. I nogle tilfælde skyldes det modelstruktur fejl, inputdata, fejl i observationsdata og i optimerede parametre.

Når de simulerede absolutte værdier kombineres med klimafremskrevne ændringer etableres et grundlag for vurderinger af risiko for oversvømmelser fra grundvand og vandløb for historiske periode og for fremtidige perioder. Brugeren kan så, ud fra opnået performance og evt. øvrige data brugeren har til rådighed i forbindelse med en given anvendelse forholde sig til om modellens resultater umiddelbart kan anvendes som en del af et beslutningsgrundlag, eller om data i form af randbetingelser kan indgå i f.eks. en lokal modellering. Endelig kan brugeren besigtige tidsserier for afstrømning og evt. pejletidsserier i forhold til målte data som en del af vurderingen af modelresultaternes gyldighed i forhold til en given anvendelse.

1.4.1. Usikkerhed på simuleringer

I forbindelse med modelarbejdet er en vurdering af troværdighed af simuleringerne relevant. Det er i DK-model HIP 500m og 100m inkl. øvrige produkter gennemført og beskrevet ovenfor ved en intern kvalitetssikring (KS) af samtlige leverancer på basis af plot af geotif filer, tidsserier, vandbalancer osv. I langt de fleste tilfælde giver resultaterne god mening. Der er imidlertid i denne kvalitetssikringsprocedure identificeret forhold vedr. inputdata, modelopstilling, kalibrering/validering og simulering der medfører en usikkerhed på resultater fra HIP4Plus, og derfor er der løbende i projektet foretaget simuleringer med henblik på kvantificering af betydning af sådanne usikkerheds- eller fejlkilder.

I nærværende afsnit er der samlet op på identificerede fejlkilder, og givet et eksempel på hvordan der ved modelkørsler er foretaget supplerende konsekvensanalyser med henblik på at vurdere betydning af identificerede fejl og betydning for simuleringsresultater.

Usikkerhedskilder som ydre og indre randbetingelser har begrænset betydning da DK-model HIP 500m leverer randbetingelser til DK-model HIP100m og de to modelsystemer løbende er kalibreret og testet f.eks. ved fuld parameteroverføring, og tilmed kalibreret og valideret på tværs af samtlige submodeller, ligesom at DK-model HIP 500m har leveret randbetingelser også for klimafremskrivning til submodeller, og genereret støttepunkter ved nedskalering til 100m. Tilsvarende har DK-model 100m leverancer bidraget som betydelige co-variater til maskinlæring i 10m. Det samme gælder indre randbetingelser som vandløb og dræn, som er håndteret så de er opstillet rimeligt konsistent og

kalibreret for hele landet. Evt. usikkerheder og fejl som følge af disse kilder vurderes derfor af sekundær betydning.

Anderledes stiller det sig vedr. evt. fejl i vandbalancen f.eks. nedbør og fordampning (inputdata) og hydrogeologiske tolkningsmodel (modelstruktur). Endelig kan der i forbindelse med klimafremskrivning være fejl i antagelser vedr. management scenarier, dvs. hvordan man beslutter at dræne i et fremtidigt klima, hvordan infrastruktur tilpasses osv. herunder hvordan man håndterer klimatilpasning. Disse forhold indgår som grundlæggende antagelser, f.eks. at man vander med sammen vandingssæson, at det er samme afgrøde for både historiske periode og fremtidige perioder på hvert modelgrid, at der drænes rimeligt optimalt overalt, også i fremtiden, hvilket kan have stor betydning for hvordan grundvandsstanden udvikler sig f.eks. på lavbundsarealer osv.

Med hensyn til fejl i nedbør er der gjort meget ud af at eliminere evt. fejl. Det er sket ved at bias korrigere klimamodel data på basis af DMI grid data for 1991-2010, som pt. vurderes at være den mindst fejlbehæftede periode pga. et større nedbørsmåler netværk end perioden efter 2010. Mht. management scenarier er der valgt at se bort fra væsentlige ændringer i driftsformen i landbruget. Det antages at vækstsæson er uændret, afgrødefordeling er uændret osv. selv om det er evident at der i våde år typisk kan ske et skifte i retning af forårsafgrøder i stedet for vinterafgrøder, og at nye afgrøder vinder frem f.eks. majs og quinoa. Disse forhold er negligeret i beregninger og fremskrivninger, og med hensyn til vandingssæson og antagelser om vanding er der heller ikke taget hensyn til evt. ændringer som følge af reguleringer mm.

Hvad angår den geologiske model, vil denne altid være forbundet med stor usikkerhed. Gennem kalibrering reduceres effekten af evt. fejl i den geologiske model. Væsentlige fejl i modelinput og -struktur viser sig typisk i form af urealistiske optimerede parametre. Der er foretaget en generel forsimpling af modellens dybere beregningslag i forhold til den oprindelige geologiske model, for at opnår en effektivisering af beregningstiden. Bl.a. er nogle lerlag og sandlag for Jylland lagt sammen særligt i den dybere del af modellen, dvs. modelstrukturen er ændret ift. DK-model2019. Dette kan have betydning, men disse er på baggrund af indledende tests vurderet acceptabelt i forhold til HIP's fokus på det terrænnære grundvand. Det vil dog formentlig i nogle tilfælde have en mindre betydning for de kalibrerede parameterværdier f.eks. på Fyn er der simuleret meget lave ledningsevner for ler i de dybere lag i modellen. Omvendt simuleres lerlag i begravede dale i Østjylland, med relativt høje ledningsevner. Da modellen kalibreres med den anvendte modelstruktur, vurderes det at disse fejlkilder ikke har væsentlig betydning for dybden til det terrænnært grundvandsspejl og afstrømning i vandløb.

GEUS har dog med hensyn til kvantificering af betydning af fordampning relateret til afgrødefordeling for landbrugsafgrøder, foretage en følsomhedsanalyse af betydning af at ændre stedspecifikke placering af vinter- og forårsafgrøder samt majs, græs i omdrift og rodfrugt. Der er kørt en simulering uden kalibrering med den anvendte arealanvendelse og en korrigeret arealanvendelse for efterfølgende at vurdere hvilken betydning denne ændringer har for vandbalancer og performance af modellen, samt for dybde til terrænnært grundvand på kommune niveau.

Vandbalancerne for perioden 1990 - 2019 for simuleringer med de to afgrødefordelinger, Tabel 16, er stort set identiske, og forskellen vurderes derfor ikke at have nogen effekt på vandbalancerne på DK-model domæne niveau. Når modellerne med de to afgrødefordelinger vurderes på performance for hhv. trykniveauer, Tabel 17 og vandføring, Tabel 18, ses ingen nævneværdig forskel. Begge modeller performer lige godt, selvom nogle enkelte størrelser ændres lidt.

Opsummeret på kommune niveau, Figur 33 viser forskellen i gennemsnitlig afstand til grundvandsspejl (1990 - 2019) med de to afgrødefordelinger at der er små forskelle på 0-3cm, hvilket er langt mindre end den generelle usikkerhed på terrænnær grundvandsstand på omkring 2m.

Tabel 16: Vandbalance udtræk [1990-2019], DK-model HIP 500m, anvendt arealanvendelse og korrigeret arealanvendelse.

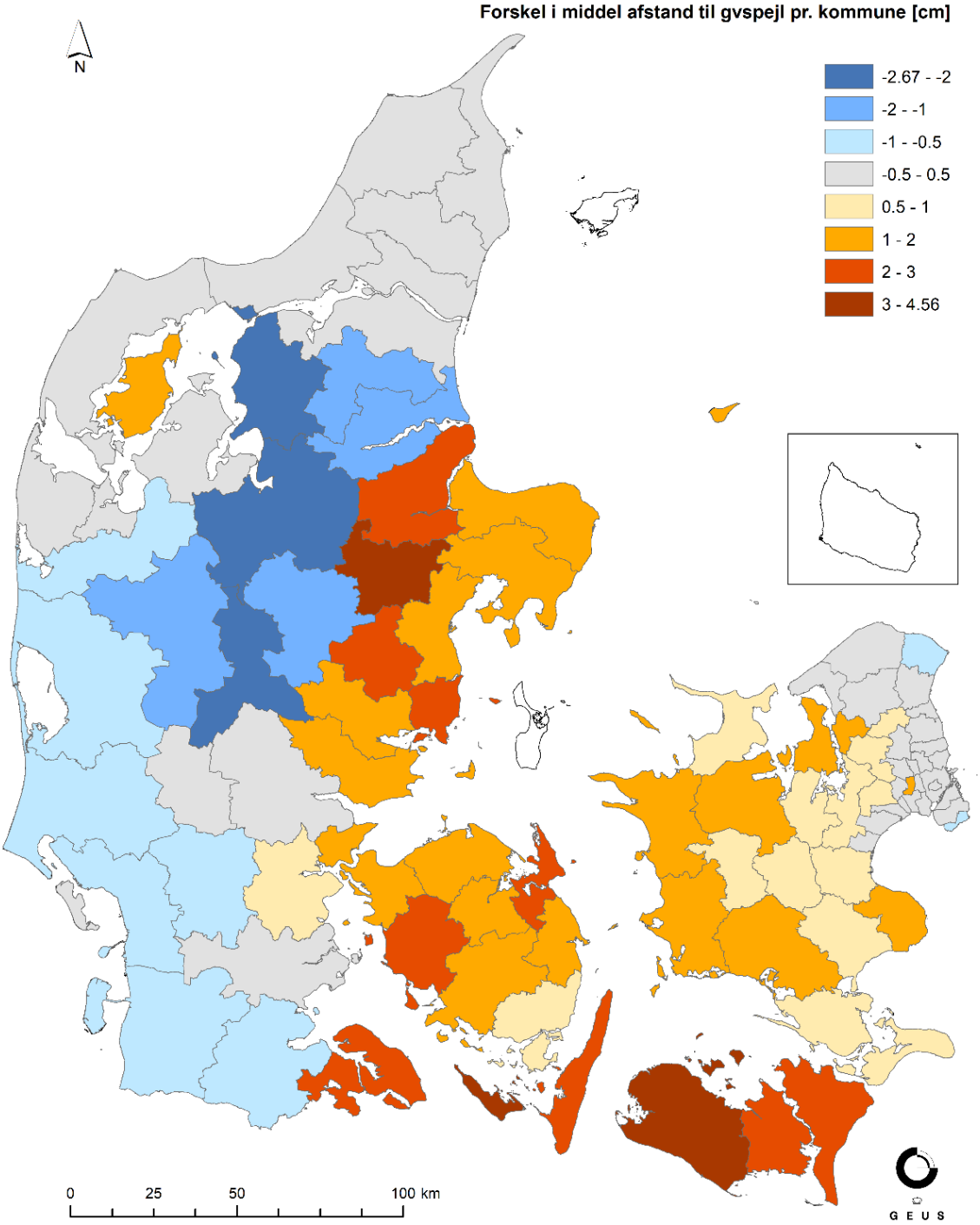
Modelområde	Nedbør [mm/år]	Fordampning [mm/år]	Baseflow [mm/år]	OL til Vandløb [mm/år]	Dræn til Vandløb [mm/år]	Nettonedbør (Nedbør - fordampning) [mm/år]	Indvinding [mm/år]	Indvinding [mio. m3/år]	Markvanding [mm/år]	Markvanding [mio. m3/år]	Nettonedbør + Markvanding - Afstrømning til vandløb - Indvinding [mm/år]	Areal [m2]
DK1 anvendt arealanvendelse	730	524	57	9	101	206	23	164	0	0	16	7195
DK1 korrigeret arealanvendelse	730	525	57	9	100	205	23	164	0	0	16	7195
DK2 anvendt arealanvendelse	712	554	27	8	108	159	5	10	0	0	11	2033
DK2 korrigeret arealanvendelse	712	548	27	8	112	164	5	10	0	0	11	2033
DK3 anvendt arealanvendelse	778	523	72	9	134	255	10	36	0	0	30	3481
DK3 korrigeret arealanvendelse	778	522	73	9	134	256	10	36	0	0	30	3481
DK4 anvendt arealanvendelse	969	527	149	16	226	442	17	134	7	58	42	7907
DK4 korrigeret arealanvendelse	969	529	149	16	223	439	16	124	6	49	42	7907
DK5 anvendt arealanvendelse	903	513	179	20	168	391	15	178	6	72	14	11551
DK5 korrigeret arealanvendelse	903	515	179	20	166	389	15	171	6	65	14	11551
DK6 anvendt arealanvendelse	876	517	124	18	158	358	11	106	2	19	49	9943
DK6 korrigeret arealanvendelse	876	521	124	18	155	355	10	103	2	17	49	9943

Tabel 17: Sammenholdning af trykniveauperformance fra anvendt rodzonedybde fordeling (1) og korrigeret rodzonedybde (2*) i DK-model HIP 500m modellen.*

			DK1		DK2		DK3		DK4		DK5		DK6	
pejledata			1*	2*	1*	2*	1*	2*	1*	2*	1*	2*	1*	2*
Alle observationer	Terrænnære	ME	1,61	1,61	0,50	0,53	0,35	0,36	-0,44	-0,44	-0,62	-0,60	0,34	0,34
		MAE	2,70	2,70	1,68	1,68	2,71	2,72	3,35	3,34	3,14	3,13	2,47	2,47
		ME90%	1,54	1,55	0,57	0,61	0,74	0,75	0,81	0,81	0,39	0,40	0,75	0,74
		MAE90%	2,23	2,23	1,23	1,23	1,98	1,99	1,88	1,88	2,08	2,07	1,70	1,70
	Dybe	ME	0,36	0,38	0,00	0,03	0,84	0,87	0,37	0,38	1,51	1,53	0,21	0,21
		MAE	3,83	3,83	2,48	2,47	6,05	6,07	3,89	3,89	4,73	4,73	3,63	3,62
		ME90%	0,96	0,97	0,11	0,14	1,62	1,63	0,95	0,96	1,61	1,63	0,75	0,75
		MAE90%	2,94	2,94	1,75	1,75	4,58	4,60	2,61	2,62	3,58	3,58	2,67	2,67
Terrænnære obs.	TWI > 6	ME	2,35	2,35	0,77	0,80	1,16	1,18	0,61	0,61	0,26	0,27	0,94	0,94
		MAE	2,88	2,88	1,40	1,39	2,43	2,44	2,42	2,42	2,51	2,51	2,20	2,20
		ME90%	2,07	2,08	0,55	0,58	1,03	1,02	0,99	0,99	0,79	0,80	0,96	0,97
		MAE90%	2,46	2,46	1,02	1,01	1,84	1,85	1,60	1,60	1,70	1,70	1,57	1,57
	TWI < 6	ME	1,24	1,25	0,34	0,38	0,10	0,11	-1,07	-1,06	-1,15	-1,13	-0,06	-0,06
		MAE	2,61	2,62	1,84	1,84	2,80	2,81	3,90	3,89	3,52	3,51	2,65	2,65
		ME90%	1,28	1,29	0,48	0,53	0,64	0,65	0,55	0,55	0,05	0,05	0,57	0,56
		MAE90%	2,11	2,11	1,34	1,35	2,02	2,04	2,12	2,11	2,34	2,33	1,80	1,80
Dybe obs.	TWI > 6	ME	0,58	0,60	0,17	0,20	1,41	1,44	0,94	0,96	1,99	2,00	0,51	0,51
		MAE	3,83	3,83	2,03	2,02	5,70	5,72	3,04	3,04	4,42	4,41	3,20	3,19
		ME90%	1,12	1,14	0,13	0,16	1,92	1,85	1,04	1,05	1,95	1,96	0,72	0,72
		MAE90%	3,02	3,02	1,65	1,65	4,33	4,35	2,08	2,09	3,38	3,37	2,37	2,37
	TWI < 6	ME	0,28	0,29	-0,08	-0,04	0,66	0,69	0,10	0,11	1,31	1,34	0,13	0,13
		MAE	3,83	3,83	2,67	2,66	6,17	6,18	4,29	4,30	4,86	4,86	3,75	3,75
		ME90%	0,90	0,90	0,10	0,12	1,53	1,52	0,90	0,92	1,45	1,46	0,74	0,74
		MAE90%	2,91	2,91	1,82	1,81	4,66	4,67	2,90	2,90	3,67	3,67	2,76	2,76

Tabel 18: Sammenholdning af vandføringsperformance fra anvendt rodzonedybde fordeling (1) og korrigeret rodzonedybde (2*) i DK-model HIP 500m modellen.*

		DK1		DK2		DK3		DK4		DK5		DK6	
	vandføringsdata	1*	2*	1*	2*	1*	2*	1*	2*	1*	2*	1*	2*
KGE	Under screening	28	26	4	4	4	4	12	13	22	21	10	11
	Screening	16	18	3	1	2	2	12	11	9	10	13	11
	Overslag	20	19	6	7	3	3	7	8	24	24	11	12
	Detail	23	24	1	2	13	13	20	19	23	23	19	19
	Over screening	68%	70%	71%	71%	82%	82%	76%	75%	72%	73%	81%	79%
WBE	Under screening	19	17	2	2	2	2	17	17	27	27	14	16
	Screening	20	24	2	0	4	4	9	11	13	14	8	8
	Overslag	19	17	5	4	6	8	12	9	15	14	9	9
	Detail	29	29	5	8	10	8	13	14	23	23	22	20
	Over screening	78%	80%	86%	86%	91%	91%	67%	67%	65%	65%	74%	70%
WBEs	Under screening	11	11	2	2	2	3	16	17	16	18	9	10
	Screening	22	20	4	5	4	4	15	14	22	20	18	17
	Overslag	13	15	3	2	8	8	4	6	13	14	9	10
	Detail	41	41	5	5	8	7	16	14	27	26	17	16
	Over screening	87%	87%	86%	86%	91%	86%	69%	67%	79%	77%	83%	81%



Figur 33: Forskel i gennemsnitlig afstand til grundvandsspejl mellem anvendt og korrigeret arealanvendelse (anvendt minus korrigeret), per kommune. Analysen er baseret på DK-model HIP 500m – derfor er Bornholm ikke med.

2. Klimafremskrivning af 500m modeller

HIP4Plus projektet har til formål at producere hydrologiske data fra klimafremskrivninger i 500x500m grid, som skal udstilles på SDFE's portal, dataforsyingen.dk, til brug for myndigheder, virksomheder og borgere.

Projektet har fokus på landsdækkende klimafremskrivninger af de terrænnære hydrologiske forhold for den nære (2041-2070) og fjerne fremtid (2071-2100). Klimafremskrivninger er simuleret med DK-model HIP 500m modellen, og derefter nedskaleret til 100m gridopløsning, se nærmere i afsnit 4.

Bornholm er en del af DK-model HIP 100m modellen og klimafremskrivningerne for Bornholm er derfor beregnet med DK-model HIP 100m og ikke et nedskaleringsprodukt.

Dette afsnit beskriver hvordan data fra klimafremskrivninger af DK-model HIP 500m modellerne er blevet tilvejebragt.

2.1. Klimamodeller

I HIP4Plus projektet benyttes regionale klimamodeller (RCM) fra Euro-CORDEX-initiativet (Jacob, et al. 2014) til klimafremskrivningerne. I Tabel 19 ses de 22 klimamodeller som benyttes til klimafremskrivningerne. Bornholm køres kun med klimamodellerne nr. 1-21. Klimamodellerne benytter både RCP4.5 og RCP8.5 emissionsscenarierne. Modellernes rumlige opløsning er 0,11 grader (12,5 km) med daglige tidsskridt. Klimadataene er blevet bias-korrigeret for at matche observationsgitteret fra Dansk Meteorologisk Institut (DMI), med cellestørrelse på 10x10 km til nedbør og 20x20 km for temperatur. Klimadata blev statistisk bias-korrigeret ved hjælp af en distributionsbaseret tilgang og nedskaleret til at matche observationsgitteret fra DMI. Metoden er beskrevet mere detaljeret af (Pasten-Zapata, Sonnenborg og Refsgaard 2019)

I Tabel 19 ses at ikke alle klimamodeller dækker hele den fjerne fremtids periode (2071-2100). Klimamodellerne som ikke dækker hele fremskrivningsperioden (Klimamodel nr. 10 – 15) er derfor forlænget ved at kopier data fra det tidligere år, så klimadata dækker hele simuleringsperioden. Klimamodel nr. 11 og nr. 14 dækker desuden ikke december måned 2099, og december måned er derfor også kopieret fra december måned 2098.

Tabel 19: Oversigt over de 22 klimamodeller der benyttes til klimafremskrivningerne, som hvilken periode de dækker over.

Nr.	Klimanavne	Periode
1	CCCma-CanESM2_rcp85_r1i1p1_GERICS-REMO2015_v1_day_19710101-21001231_Denmark	1971-2100
2	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp85_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1_day_19710101-21001231_Denmark	1971-2100
3	ICHEC-EC-EARTH_rcp45_r3i1p1_DMI-HIRHAM5_v1_day_19710101-21001231_Denmark	1971-2100
4	ICHEC-EC-EARTH_rcp85_r1i1p1_KNMI-RACMO22E_v1_day_19710101-21001231_Denmark	1971-2100
5	ICHEC-EC-EARTH_rcp85_r3i1p1_DMI-HIRHAM5_v1_day_19710101-21001231_Denmark	1971-2100
6	ICHEC-EC-EARTH_rcp85_r12i1p1_KNMI-RACMO22E_v1_day_19710101-21001231_Denmark	1971-2100
7	IPSL-IPSL-CM5A-MR_rcp45_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1_day_19710101-21001231_DENMARK_ filled.npy.nc	1971-2100
8	IPSL-IPSL-CM5A-MR_rcp85_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1_day_19710101-21001231_DENMARK_ filled.npy.nc	1971-2100
9	MIROC-MIROC5_rcp85_r1i1p1_GERICS-REMO2015_v1_day_19710101-21001231_DENMARK	1971-2100
10	MOHC-HadGEM2-ES_rcp85_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1_day_20060101-20991230_DENMARK_ filled.npy.nc	1971-2099
11	MOHC-HadGEM2-ES_rcp45_r1i1p1_KNMI-RACMO22E_v2_day_19710101-20991130_DENMARK_ 90_checked_filled.npy.nc	1971-2099
12	MOHC-HadGEM2-ES_rcp85_r1i1p1_DMI-HIRHAM5_v1_day_19710101-20991230_DENMARK_ filled.npy.nc	1971-2099
13	MOHC-HadGEM2-ES_rcp85_r1i1p1_GERICS-REMO2015_v1_day_19710101-20991230_DENMARK _filled.npy.nc	1971-2099
14	MOHC-HadGEM2-ES_rcp85_r1i1p1_KNMI-RACMO22E_v2_day_19710101-20991130_DENMARK _filled.npy.nc	1971-2099
15	MOHC-HadGEM2-ES_rcp85_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1_day_19710101-20991230_DENMARK _filled.npy.nc	1971-2099
16	MPI-M-MPI-ESM-LR_rcp45_r1i1p1_MPI-CSC-REMO2009_v1_day_19710101-21001231_DENMARK	1971-2100
17	MPI-M-MPI-ESM-LR_rcp45_r2i1p1_MPI-CSC-REMO2009_v1_day_19710101-21001231_DENMARK	1971-2100
18	MPI-M-MPI-ESM-LR_rcp85_r1i1p1_MPI-CSC-REMO2009_v1_day_19710101-21001231_DENMARK	1971-2100
19	MPI-M-MPI-ESM-LR_rcp85_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1a_day_19710101-21001231_DENMARK	1971-2100
20	MPI-M-MPI-ESM-LR_rcp85_r2i1p1_MPI-CSC-REMO2009_v1_day_19710101-21001231_DENMARK	1971-2100
21	NCC-NorESM1-M_rcp85_r1i1p1_DMI-HIRHAM5_v2_day_19710101-21001231_DENMARK	1971-2100
22	ICHEC-EC-EARTH_rcp85_r12i1p1_SMHI-RCA4_v1_day_19710101_21001231_DENMARK_reg	1971-2100

2.2. Hydrologiske klimafremskrivninger

Det anvendte hydrologiske modelleringssoftware er MIKE SHE / MIKE HYDRO (version 2020 service-pakke 1) (DHI A/S 2020). Den hydrologiske modelleringsopsætning baseres på DK-model HIP 500m.

Klimakørslerne køres i tre perioder (reference, nærfremtid og fjernfremtid) af 30 år. Klimadata for referencekørsel udtrækkes for perioden 01-01-1991 til 31-12-2020, og klimadata for nær- og fjern-fremtid udtrækkes for hhv. 01-01-2041 til 31-12-2070 og 01-01-2071 til 31-12-2100. Alle modeller er kørt med et opvarmningsår, og dermed kørt et år tidligere end udtræksperioden, se Tabel 20.

I Tabel 21 fremgår de overordnede forskelle og opdateringer fra DK-model HIP 500m modellen til klimakørslerne.

Til HIP4Plus projektet simuleres 66 klimakørsler (22 klimamodeller * 3 perioder) og i Tabel 22 vises de forskellige resultater modellerne producerer, og med hvilke tidsintervaller. Bornholm køres kun med 21 klimamodeller.

Tabel 20: Oversigt over kørsel periode og udtræksperioden for reference, nær-og fjernfremtid kørsel.

	Kørsel periode	Udtræksperiode
Reference kørsel	01-01-1990 til 31-12-2020	01-01-1991 til 31-12-2020
Nær-fremtid kørsel	01-01-2040 til 31-12-2070	01-01-2041 til 31-12-2070
Fjern-fremtid kørsel	01-01-2070 til 31-12-2100	01-01-2071 til 31-12-2100

Tabel 21: Oversigt med overordnede forskelle og opdateringer i DK-model HIP 500m modellen til klimakørslerne.

Modelopsætning	DK-model HIP 500m	Klimakørsel
Simuleringsperiode	02-06-1989 til 31-12-2019 (inkl. opvarmningsår)	Simuleringsperioden er ændret ift. til Tabel 20 for hhv. reference kørsel, nær-fremtid kørsel og fjern-fremtid kørslerne
Hot-start dato	20-12-2010	Hot-start dato er ændret ift. til Tabel 24 for hhv. reference kørsel, nær-fremtid kørsel og fjern-fremtid kørslerne
Nedbørsdata (klimadata)	Aktuelle nedbørsdata for perioden 1989-2020	Fremskrevne nedbørsdata for perioden 1971-2100
Evatranspirations data (klimadata)	Aktuelle evatranspirations data for perioden 1989-2020	Fremskrevne evatranspirations data for perioden 1971-2100
Temperatur data (klimadata)	Aktuelle temperatur data for perioden 1989-2020	Fremskrevne temperatur data for perioden 1971-2100
Grundvandsindvinding	Varierende indvindingsfil: 1989-2019	Konstant årlig grundvandsindvinding (gennemsnit fra perioden 2010-2019) anvendes benyttes for hele perioden 1971-2100.
Spildevandsudledning	Varierende spildevandsfil: 1990-2011 (konstant spildevand fra 1950-1990 og 2011-2050)	Konstant årlig spildevandsudledning (gennemsnit fra perioden 2001-2011) anvendes benyttes for hele perioden 1971-2100.
Hydraulisk trykniveau I modelafgrænsningen i øverste-beregningslag (hotstart kørsler)	Hydraulisk trykniveau sat til nul i modelafgrænsningen. Hav/land niveau fil til at definere havniveauet til kote nul (dk_internal_boundary_500m.dfs2)	Hydraulisk trykniveau i modelafgrænsningen benytter en tidslig interpolerede dfs0-fil. Se afsnit 2.2.1.
Hydraulisk trykniveau I modelafgrænsningen i øverste beregningslag	Hydraulisk trykniveau sat til nul i modelafgrænsningen. Hav/land niveau fil til at definere havniveauet til kote nul (dk_internal_boundary_500m.dfs2)	Hydraulisk trykniveau i modelafgrænsningen benytter en rumlig interpolerede dfs2-fil. Hav/land-fil er revideret for at hav inkl. fjord, og udvidet mod den dansk/tyske grænse. Se afsnit 2.2.1
Hydraulisk trykniveau i fjorde i øverste beregningslag	Hydraulisk trykniveau sat til nul i fjorde	Hydraulisk trykniveau i fjorde er sat efter havniveauet i den klimafremskrevne periode. Se afsnit 2.2.1.

Tabel 22: Oversigt over output resultaterne som klimamodeller producerer.

Grid series output item	Beskrivelse	Resultat navn	Gemme interval
Rooting depth	Roddybden definerer den dybde, hvor ET kan hente vand til (DHI, 2017). Der udtrækkes kun en dybde for en kørsel, for hele Danmark, da denne fil er ens for alle 22 klimamodeller.	*ET_AllCells.dfs2	24 timer
Water content in root zone (2-layer UZ)	Vandindhold i rodzonen angivet i %	*wetland.dfs2	24 timer
Total recharge to SZ (pos.down)	Nettonedbør angivet i mm/døgn	*2DUZ_AllCells_daily.dfs2	24 timer
Depth to phreatic surface(negative)	Dybden til den mættet zone. Dybden (afstanden fra terræn til grundvandsspejl) angives med negativt fortegn (m.o.t.)	*2DSZ_daily.dfs2	24 timer
Head elevation I saturated zone	Hydraulisk trykniveau for hver beregningslag lag i modellen angivet i m (DVR90)	*3DSZ.dfs3	15 døgn
Groundwater flow in x-direction	Vandstrømning i horizontal retning (x-vekor) for hvert beregningslag angivet i m^3/s	*3DSZflow.dfs3	90 døgn
Groundwater flow in y-direction	Vandstrømning i horizontal retning (y-vekor) for hvert beregningslag angivet i m^3/s	*3DSZflow.dfs3	90 døgn
Groundwater flux in z-direction	Vandstrømning til hvert beregningslag angivet i mm/døgn	*3DSZflow.dfs3	90 døgn
Punk data	**Beskrivelse**	**Resultat navn**	**Gemme interval**
Q-points	Vandføring for alle beregningspunkterne i de simulerede vandløb angivet i m^3/s	*.res1D	24 timer
Time series output item	**Beskrivelse**	**Resultat navn**	**Gemme interval**
Detailed WM time series	En detaljeret tidsserier af det hydrauliske trykniveau på angivet sted i modellen.	*DetailedTS_SZ.dfs0	24 timer

2.2.1. Havniveaustigninger

For at implementere havniveaustigninger til de fremtidige kørsler er det hydraulisk trykniveau i modelafgrænsningen i det øverste beregningslag sat efter havniveauet i den pågældende periode. Input-data for det fremskrevne havniveau er baseret på DMI klimaatlas (Klimaatlas 2020). Klimaatlas viser blandt andet havniveaustigninger for de to klimascenarier RCP8.5 og RCP4.5 for perioden 2041-2070 og 2071-2100. Et eksempel på et udsnit fra DHI's klimaatlas hjemmeside ses på Figur 34. Klimaatlasset viser forskellige klimaatlas-zoner (orange polygoner), som hver har en beregnet fremskrevet havniveau.

Figur 34: Udsnit fra DHI's klimaatlas hjemmeside (Klimaatlas 2020). Hver klima-atlas-zone (orange zoner på kortet) repræsentere et forskelligt havniveau.

Havniveaustigningerne er implementeret forskelligt i opsætningen af modellerne til hotstart kørslerne ift. produktionskørslerne. Opstillingen af hhv. havniveau stigningerne i hotstart-kørslerne og produktionskørslerne beskrives nærmere i næste afsnit.

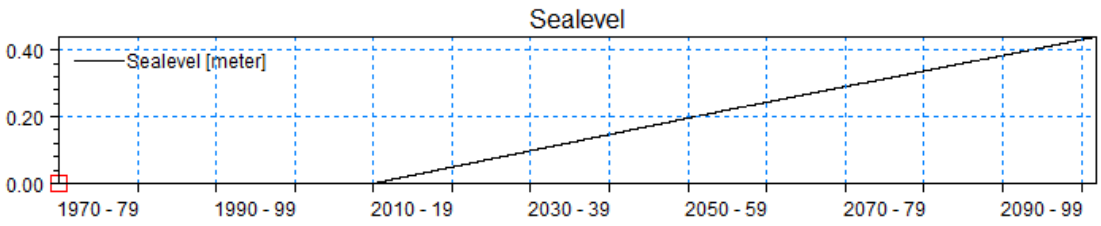
I Tabel 23 vises hvilke filer der er benyttet til at implementere havniveau stigningerne i modelopsætningerne for hhv. hot start kørslerne og produktionskørslerne. I DK-model HIP 500m er der i det øverste beregningslag indlagt fastholdt trykniveau for fire fjorde i Danmark, som har et trykniveau i 0m. I klimakørslerne er disse fjorde tillagt det samme trykniveau som havet umiddelbart udenfor fjordene.

Tabel 23: Havniveaufilerne som benyttes i hhv. hot start kørslerne og produktionskørslerne.

	Hot start kørsler	**Produktionskørsler**
Ydre modelgrænse (”Outer boundary”)	.dfs0 (tidserie fil): Sealevel_areaXX_RCP45.dfs0/ Sealevel_areaXX_RCP85.dfs0	.dfs2 (grid-fi): RCP45_Sealevel_2040_2070.dfs2/ RCP85_Sealevel_2040_2070.dfs2
Indre modelgrænse (”Internal boundary”)	.dfs0 (tidserie fil) og . dfs2 (grid-fi): dk_internal_boundary_500m.dfs2 Sealevel_areaXX_RCP45.dfs0/ Sealevel_areaXX_RCP85.dfs0	.dfs2 (grid-fi): dk_internal_boundary_500m_climate.dfs2 RCP45_Sealevel_2040_2070.dfs2/ RCP85_Sealevel_2040_2070.dfs2

Havniveau i hot start kørslerne

Havniveauet i hotstart kørslerne benytter en lineær tidslig interpolation mellem den nuværende periode, hvor havniveauet er i kote nul, og de to fremtidige perioder 2041-2070 og 2071-2100. Der laves dermed en lineær interpolation fra den 01-01-2010 som anses for at have havniveau på kote nul til midten af første periode, 2055 (midten af 2041-2070), derfra laves en ny lineær interpolation frem til midten af næste periode, 2085 (midten af 2071-2100). For hver klimaatlas-zone blev der lavet en dfs0-fil med det lineære tidslige interpolerede havniveau. Et eksempel på den stykvis lineære tidslige interpolerede havniveau i en klimatlas-zone ses på Figur 35.



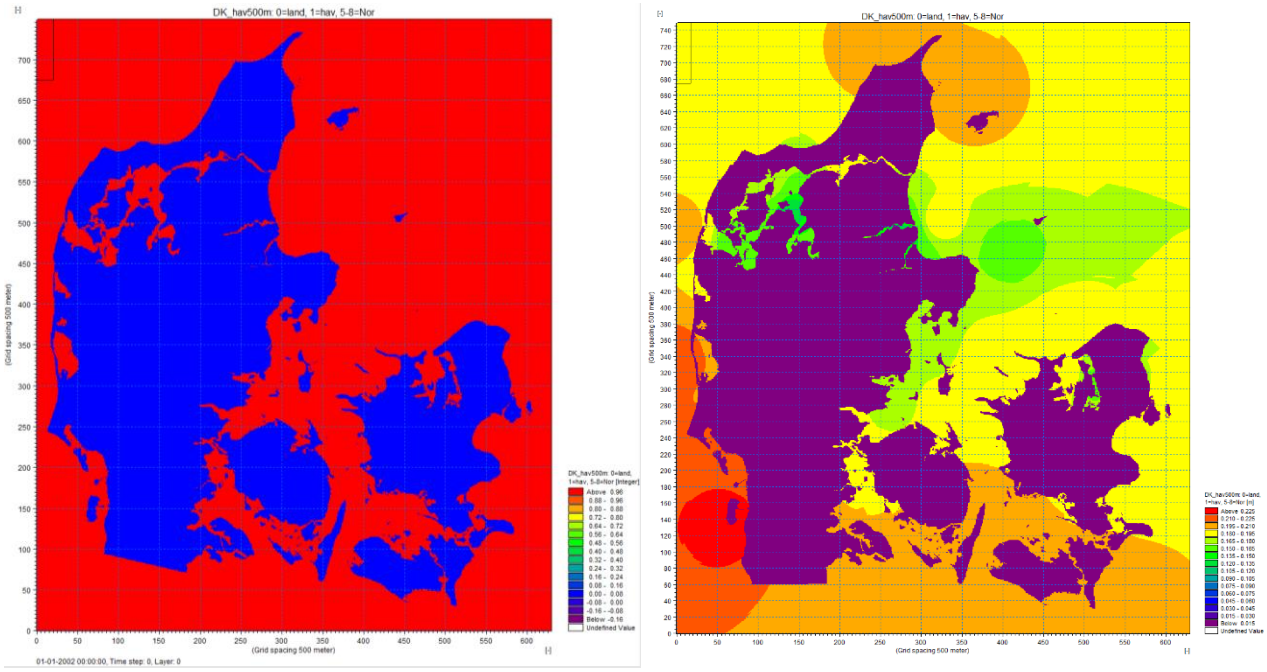
Figur 35: Eksempel på den tidslige interpolerede havniveau i en klimaatlas-zone.

Havniveau i produktionskørslerne

Havniveauet i produktionskørslerne er rumlig interpoleret mellem de forskellige klimaatlas-zoner. Hver af produktionskørslerne benytter et konstant tidsligt havniveau i reference, nærfremtid og fjernfremtid kørslerne.

For at definere randbetingelserne for hav og land benyttes en revideret fil af "dk_internal_boundary_500m.dfs2" fra DK-model HIP 500m modellen, da vi ønskede at inkluderet fjorde i "hav" samt at få landarealet i dfs2 filen udvidet mod den dansk-tyske grænse for at sikre at der er land på begge sider af modelafgrænsningen. Et eksempel den revideret fil af "dk_internal_boundary_500m.dfs2" ses på Figur 36.

Desuden beregnes en dfs2-fil med havniveau til produktionskørslerne. Dette gøres ved at finde centroiden for hver klimaatlas-zone i DHI's klimaatlas. Hver centroide punkt repræsenterer en havniveauværdi for en periode og et af RCP-scenarierne. Centroide punkterne interpoleres over havarealet med inverse distance weightning (IDW, Power=2, number of points=12), og der dannes derefter dfs2-filer (grid-fil), hvor hvert grid-celle har en værdi som repræsenteret havniveauet. Denne fil benyttes i til at definere de ydre randbetingelser ("Outer boundary conditions") i havet og indre randbetingeler ("Internal boundary condition") i det øverste beregningslag hvor der er hav/fjorde. For fjorde hvor vandstanden styres af sluser antages vandstanden at være lig havniveau uden for slusen. Et eksempel på en rumlig interpoleret dfs2-fil som benyttes som havniveaufil i nær-fremtid perioden (RCP8.5) ses på Figur 36.



Figur 36: Figuren viser de dfs2-filer der benyttes til at definere havniveaet i produktionskørslerne. TV. ses den dfs2-fil der definere hvor der er hav/fjord og land. TH. ses den dfs2-fil der viser et eksempel på det rumligt interpolerede havniveau som benyttes i produktionskørslerne.

2.2.2. Hot start

Alle klimakørslerne er kørt med hot start-data. Hot start-data bruges til at starte simulering fra et tidligere modelresultat (DHI, 2017). Dette er nyttigt, når kørselstiden til simuleringen er lang. I dette tilfælde køres hotstart-simulering i 130 år (01-01-1971 til 31-12-2100), og der benyttes hotstart dataværdier fra omkring midten af hver kørsel-periode til hhv. reference, nær- og fjernfremtid kørslerne, se Tabel 24.

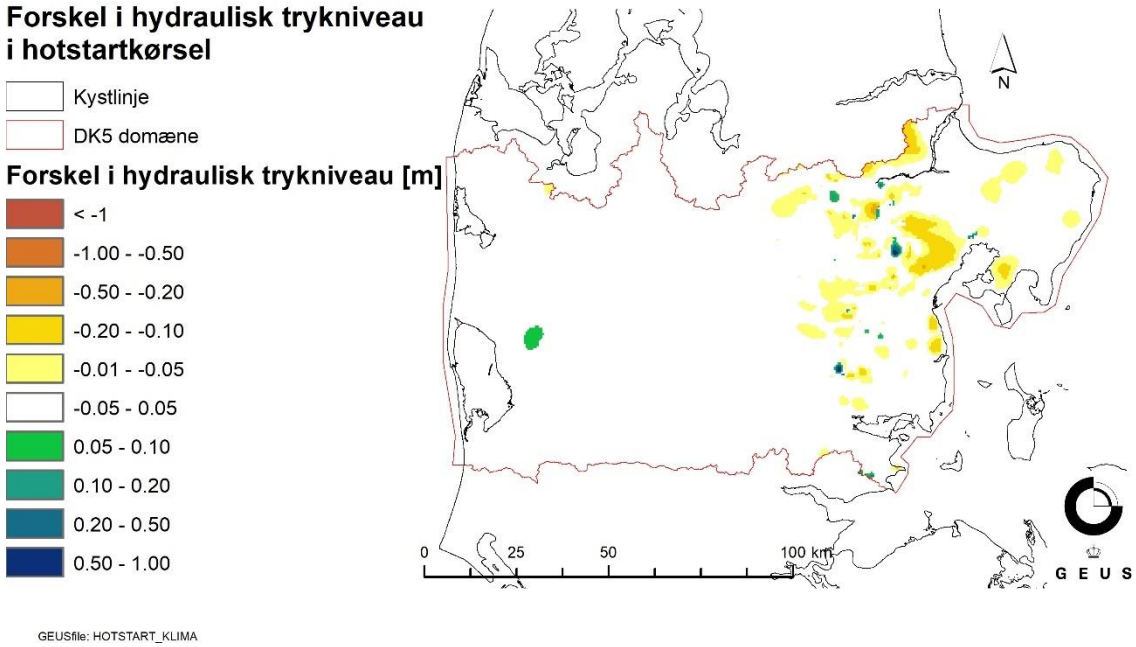
Tabel 24: Oversigt over hotstart datoer benyttet i reference, nær-og fjernfremtid kørsel.

	Hotstart dato
Reference kørsel	23-12-2004
Nær-fremtid kørsel	11-12-2054
Fjern-fremtid kørsel	03-12-2084

Erfaringer viser at der kan være en forsinkelse i klimasignalet fra input-data på de dybere grundvandsmagasiner, og det er derfor vigtigt at have gode initiale start værdier fra hotstart kørslerne. Der er derfor foretaget nogle test på indflydelsen af at køre en kontinuert 115 års klimakørslerne (1971-2085) som hotstart på en fjern-fremtid klimakørsel, i forhold til en 30 år hotstart (som selv har en 100 års hotstart) til en fjern-fremtid klimakørsel.

Testen blev udført ved at køre en 115 års og 30 års hot-start kørslen for modeldomæner DK5 for både en klimakørsel. Derefter blev der kørt to fjern-fremtid klimakørsel, med de to forskellige hot start-data for at undersøge forskellen som forskellige hot start-data producerede. Det hydraulisk

trykniveau for hver beregningslag lag i modellen blev trukket ud, og de forskellige hot start kørsler blev sammenlignet med hinanden. I Figur 37 ses forskellen mellem modellen kørt med 115 års hot start og 30 års hot start i nederste beregningslag (”115 års hot start”-kørsel minus ”30 års hotstart”-kørsel). Forskellen i det hydraliske trykniveau anses som ubetydelig, og hotstart-kørslerne som bliver benyttet i HIP4Plus klimakørsler er de 115 års hotstarts kørsler.



Figur 37: Kort over forskellen i det hydrauliske trykniveau mellem en klimamodel kørt med 115 års hot start og 30 års hot start i nederste beregningslag.

3. Efterbearbejdning af modelsimuleringer

Følgende afsnit beskriver statistiske efterbearbejdninger og bearbejdning af randbetingelser.

3.1. Beskrivelse af statistisk efterbearbejdning

Standard statistik udregnes med funktioner Pandas biblioteket. I Tabel 25 er "s": data som pandas tidsserie

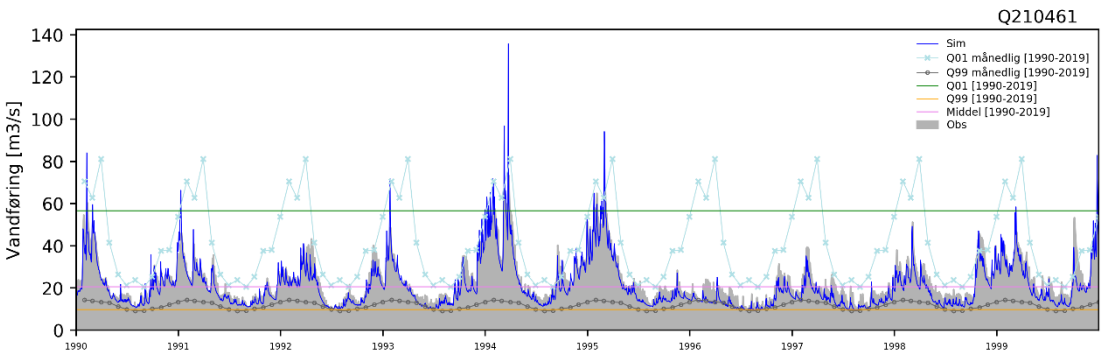
Tabel 25: Standard statistik.

Statistisk størrelse	Kort navn	Formel
Middelværdi	mean	s.mean()
Minimumsværdier	min	s.min()
Maksimumsværdier	max	s.max()
Standardafvigelse	std	s.std()

Overskridelses percentiler (også kaldet top percentiler), beskriver hvor stor en andel af data som ligger over værdien. Fx Q99= ca. 10 m^3/s på Figur 38 betyder at 95% af vandføringen for perioden er større end 10 m^3/s. Overskridelses percentiler udregnes med funktioner Pandas biblioteket. I Tabel 26 er "s": data som pandas tidsserie.

Tabel 26: Overskridelses percentil statistik

Statistisk størrelse	Kort navn	Formel
1% overskridelses percentil	Q01	s.quantile(0.99, interpolation='linear')
5% overskridelses percentil	Q05	s.quantile(0.95, interpolation='linear')
10% overskridelses percentil	Q10	s.quantile(0.90, interpolation='linear')
25% overskridelses percentil	Q25	s.quantile(0.75, interpolation='linear')
50% overskridelses percentil	Q50	s.quantile(0.50, interpolation='linear')
75% overskridelses percentil	Q75	s.quantile(0.25, interpolation='linear')
90% overskridelses percentil	Q90	s.quantile(0.10, interpolation='linear')
95% overskridelses percentil	Q95	s.quantile(0.05, interpolation='linear')
99% overskridelses percentil	Q99	s.quantile(0.01, interpolation='linear')



Figur 38: Visuel eksempel af udvalgt vandføringsstatistik (Q210461). Tidserie viser kun 1990-2000, mens statistikken er beregnet for hele den historiske periode 1990-2019.

Af særlige statistiske størrelser udregnes der for afstrømning median maksimum og median minimum og for dybde til grundvandsspejlet (modelteknisk negative værdier nedad, fx -1 meter betyder 1 meter fra terræn ned til grundvandsspejlet) udregnes frekvens for overskridelser af mindre end 2 meter til grundvandsspejlet og mindre end 1 meter til grundvandsspejlet, dvs. hvor ofte er grundvandsspejlet tæt (2m) og meget tæt (1m) på terræn. Alle fire størrelser udregnes med en kombination af funktioner fra Pandas biblioteket. I Tabel 27 er "s": data som pandas tidsserie.

Tabel 27: Særlig statistik størrelser

Statistisk størrelse	Kort navn	Formel
Frekvens for grundvandsspejl tættere end 1 mut	d1mut	s[(s > -1.0)].count()/s.count()
Frekvens for grundvandsspejl tættere end 2 mut	d2mut	s[(s > -2.0)].count()/s.count()
Median maksimum	medmax	s.resample('A').max().median()
Median minimum	medmin	s.resample('A').min().median()

Der er gennemført ekstremværdi analyse med udsøgning af årlige ekstremer (block-maxima) og fit til den generaliserede ekstremværdi fordeling (GEV). Ekstremværdi analysen er gennemført vha python biblioteket "Lmoments3" (https://open-hydrology.readthedocs.io/projects/lmoments3/en/stable/). I Tabel 28 er funktionskaldet til gevfit.ppf hentet fra lmoments3, det fulde formeludtryk kan ses af Figur 39.

Tabel 28: Ekstremværdi statistik

Statistisk størrelse	Kort navn	Formel
2-årshændelse	T2	gevfit.ppf(1.0-1/2)
5-årshændelse	T5	gevfit.ppf(1.0-1/5)
10-årshændelse	T10	gevfit.ppf(1.0-1/10)
20-årshændelse	T20	gevfit.ppf(1.0-1/20)
50-årshændelse	T50	gevfit.ppf(1.0-1/50)
100-årshændelse	T100	gevfit.ppf(1.0-1/100)

```
def evaT(s):
    """
    Extreme value analysis using Block-Maxima + GEV distribution
    input:
        s: simulated timeseries as Pandas dataseries
    output:
        evaT: dataframe with return periods for 2, 5, 10, 20, 50 and 100 year events
    """
    from lmoments3 import distr
    import pandas as pd

    Tvalues = pd.DataFrame(index=['T2', 'T5','T10','T20','T50','T100'])
    ymax = s.resample('A').max()
    T = np.array([2,5,10,20,50,100])
    for f in list(ymax.columns):
        try:
             # estimate parameters assuming Generalised Extreme Value (GEV) distribution
             gevpars = distr.gev.lmom_fit(ymax[f])
             gevfit = distr.gev(**gevpars)
             # calculate return periods for 2, 5, 10, 20, 50 and 100 year events
             Tvalues[f] = gevfit.ppf(1.0-1/T)
        except:
            # if data doesn't fit GEV, eg. areas with water above terrain
            # set return_periods to 0 for all events
             Tvalues[f] = [0.0]*6
    return Tvalues.T
```

Figur 39: Formeludtryk til beregning af ekstremværdi statistik

Alt statistik er udregne for faste perioder. Som standard udregnes statistikken for hele 30 års perioden, men en stor del af statistikken udregnes også for del perioder, som fx data for alle dage i januar måneder i 30 års perioden (fx januar 1990, januar 1991, …, januar 2019). Udvælgelse af data fra de enkelte perioder sker vha. standard Pandas funktionalitet. I Tabel 29 er "s”: data som pandas tidsserie.

Tabel 29: Periode udvælgelse fra tidsseriedata

Statistisk størrelse	Kort navn	Formel
vinter sæson	winter	s[s.index.month.isin([12,1,2])]
forårs sæson	spring	s[s.index.month.isin([3,4,5])]
sommer sæson	summer	s[s.index.month.isin([6,7,8])]
efterårs sæson	autumn	s[s.index.month.isin([9,10,11])]
januar måned	jan	s[s.index.month == 1]
februar måned	feb	s[s.index.month == 2]
marts måned	mar	s[s.index.month == 3]

april måned	apr	s[s.index.month == 4]
maj måned	may	s[s.index.month == 5]
juni måned	jun	s[s.index.month == 6]
juli måned	jul	s[s.index.month == 7]
august måned	aug	s[s.index.month == 8]
september måned	sep	s[s.index.month == 9]
oktober måned	oct	s[s.index.month == 10]
november måned	nov	s[s.index.month == 11]
december måned	dec	s[s.index.month == 12]

For tidsserie griddata, som håndteres på NetCDF format, består den statistiske bearbejdning af en simpel tidsaggregering. Data indlæses vha Python biblioteket Xarray. I Tabel 30 er 'ds' en multi dimensionel tidsserie indlæst fra NetCDF med funktionskaldet "xarray.load_dataset(fname + '.nc'), hvor fname er navnet på NetCDF filen som indeholder tidsserie grid med daglige data.

Tabel 30 Tidsaggregering af NetCDF filer

Statistisk størrelse	**Kort navn**	**Formel**
måneds aggregering	month	ds.resample(time='MS').mean().to_netcdf(fname+'_month.nc')
sæson aggregering	season	ds.resample(time='QS-DEC').mean().to_netcdf(fname+'_season.nc')
årlige aggregering	year	ds.resample(time='AS').mean().to_netcdf(fname+'_year.nc')

For den fremskrevne periode er leverancen median og standard afvigelse på tværs af dels RCP85 og dels RCP45 klimasimuleringer. Medianen og standardafvigelsen udregnes på baggrund af ændringerne i statistik for nær- hhv. fjern fremtid minus statistik for reference periode fsa dybde til grundvandsspejl (phreatic i Tabel 31) og vandindhold i umættet zone (uzwater i Tabel 31), og på baggrund af ændringerne i statistik for nær- hhv. fjern fremtid divideret med referenceperiode fsa. Afstrømning i vandløb (discharge i Tabel 31). Eksempelvis skal medianen for RCP8.5 forstås som medianændringen af de klimasimuleringerne med dette CO2 scenarie. I Tabel 31 er listet de navne angivelser der er anvendt i leverancerne. Som prefix vil være angivet dels model området (fx DK1) alternativt dkm, i de tilfælde at data er samlet for hele landet undtagen Bornholm, dels DK-model versionen og DK-model opløsningen (fx 100m) og dels CO2 scenariet.

Tabel 31 Median og standard afvigelse på tværs af klimasimuleringer

Kort navn	Beskrivelse
rf_median_phreatic	median af de enkelte klimascenariers statistik for reference periode simulering af dybde til grundvandsspejlet
nf_median_phreatic	median af forskel mellem de enkelte klimascenariers statistik for reference periode og nær fremtids periode simulering af dybde til grundvandsspejlet
ff_median_phreatic	median af forskel mellem de enkelte klimascenariers statistik for reference periode og fjern fremtids periode simulering af dybde til grundvandsspejlet
rf_std_phreatic	standard afgivelse mellem de enkelte klimascenariers statistik for reference periode simulering af dybde til grundvandsspejlet
nf_std_phreatic	standard afgivelse af forskel mellem de enkelte klimascenariers statistik for reference periode og nær fremtids periode simulering af dybde til grundvandsspejlet
ff_std_phreatic	standard afvigelse af forskel mellem de enkelte klimascenariers statistik for reference periode og fjern fremtids periode simulering af dybde til grundvandsspejlet
rf_median_uzwater	median af de enkelte klimascenariers statistik for reference periode simulering af vandindhold i umættet zone
nf_median_uzwater	median af forskel mellem de enkelte klimascenariers statistik for reference periode og nær fremtids periode simulering af vandindhold i umættet zone
ff_median_uzwater	median af forskel mellem de enkelte klimascenariers statistik for reference periode og fjern fremtids periode simulering af vandindhold i umættet zone
rf_std_uzwater	standard afgivelse mellem de enkelte klimascenariers statistik for reference periode simulering af vandindhold i umættet zone
nf_std_uzwater	standard afgivelse af forskel mellem de enkelte klimascenariers statistik for reference periode og nær fremtids periode simulering af vandindhold i umættet zone
ff_std_uzwater	standard afvigelse af forskel mellem de enkelte klimascenariers statistik for reference periode og fjern fremtids periode simulering af vandindhold i umættet zone
rf_median_river	median af de enkelte klimascenariers statistik for reference periode simulering af afstrømning i vandløb
nf_median_river	median af de enkelte klimascenariers statistik for nær fremtids divideret med statistik for reference periode af afstrømning i vandløb
ff_median_river	median af de enkelte klimascenariers statistik for fjern fremtids divideret med statistik for reference periode af afstrømning i vandløb
rf_std_river	standard afvigelse af de enkelte klimascenariers statistik for reference periode simulering af afstrømning i vandløb
nf_std_river	standard afvigelse af de enkelte klimascenariers statistik for nær fremtids divideret med statistik for reference periode af afstrømning i vandløb
ff_std_river	standard afvigelse af de enkelte klimascenariers statistik for fjern fremtids divideret med statistik for reference periode af afstrømning i vandløb

3.2. Bearbejdning af randbetingelser

For alle modelkørsler er der dannet NetCDF af trykniveau for alle lag med 15 dages opløsning og nettonedbør, dybde til grundvandsspejlet og afstrømning i vandløb med 1 dags opløsning. Herudover er der dannet NetCDF data med modellag. NetCDF'erne er dannet ved direkte transformation af modelresultater på dfs2 format vha. python programpakken HydroInform (NetCDF underbibliotek), dvs. med den modelspecifikke lagnummerering, Tabel 32 for 3D data (modellag og tidsvarierende trykniveau), og angivet i de enheder modellen arbejder i (fx mm/døgn for nettonedbør).

Der er udtrukket tidsvarierende data for de historiske simuleringer og for tre perioder for hver af klimasimuleringerne (reference, nær fremtid og fjern fremtid), således at det er muligt at opstille en lokalmodel og afvikle såvel historiske som klimasimuleringer med randbetingelser fra DK-model HIP. Det skal bemærkes at DK-model HIP er afviklet i 100m grid for den historiske periode og randbetingelserne ligger tilgængelige i 100m, men ikke for den klimasimuleringerne da disse er afviklet i 500m grid, hvorfor randbetingelserne for disse kun er tilgængelige i 500m grid.

For alle randbetingelsesdata er der dannet tif filer med middelværdier for de enkelte 30 års perioder (historisk, reference, nær fremtid og fjern fremtid). Tif filerne er angivet i bearbejde enheder (fx mm/år for nettonedbør) og data fra de enkelte vandførende modellag er oversat til grundvandførende lag 1-6 (gwl1-gwl6 - Tabel 32). Tif filerne med middelværdier forventes at blive brugt i orienterende arbejde og som input stationært input til lokalmodeller, hvor det primært er de vandførende enheder der vil være brug for at låse fast med en tryk eller flux rand (ikke vandførende enheder vil typisk låses fast med no-flow rande). For den historiske periode er der desuden dannet middelværdier for den horisontale grundvandsflux for alle den vandførende lag. Disse data er ikke udtrukket med det formål at skulle bruges direkte som modelrand til en lokal model, men de er i stedet tænkt anvendt i det orienterende arbejde, fx til lokalmodel afgrænsning og placering af randbetingelser.

Tabel 32: Sammenhæng mellem modellag i DK-model2019 og DK-model HIP (lag nummerering og vandførende lag navn (gwl)

DKM2019 lag DK1-DK6 (DK7)	***Lagnr- lagnavn DK1-DK2***	***Lagnr- lagnavn DK3***	***Lagnr- lagnavn DK4-DK6***	***Lagnr- lagnavn DK7***
top2m	*10*	*8*	*10*	*6*
kl1	*9*	*7*	*9*	*-*
ks1 (blag1)	*8 - glw1*	*6 - glw1*	*9 – glw1**	*5 - glw1*
kl2	*7*	*5*	*9*	*-*
ks2 (blag2)	*6 – glw2*	*4 – glw2*	*9 – glw1**	*4 – glw2*
kl3	*5*	*3*	*8*	*-*
ks3 (blag3)	*4 – glw3*	*2 – glw3*	*7– glw2*	*3 – glw3*
kl4	*3*	*1*	*6*	*-*
ks4 (blag4)	*2 – glw4*	*-*	*5 – glw3*	*2 – glw4*
kl5	*1*	*-*	*4*	*-*
ks5 – ps1 (blag5)	*-*	*-*	*3 – glw4**	*1 – glw5*
pl2	*-*	*-*	*2*	*-*
ps2 – ps6	*-*	*-*	*1 – glw5**	*-*
kalk (blag6)	*0 – glw6*	*0 – glw6*	*0 – glw6*	*0 – glw6*

** flere lag fra DK-model2019 er slået sammen til et beregningslag i DK-model HIP*

- betyder at laget ikke eksisterer i det pågældende modeldomæne

() betyder lagnavn gældende for DK7 - Bornholm

4. Nedskalering af klimafremskrivninger til 100m

På grund af beregningsmæssige begrænsninger, kan den landsdækkende hydrologiske model i den finere 100m opløsning ikke køres med ensemblet af de 22 klimamodeller, Tabel 19, på samme måde som udført for 500m modellen (beskrevet i afsnit 2). For alligevel at kunne udstille effekten af klimaændringerne på grundvandsspejlet i den ønskede finere opløsning på 100m gennemføres en nedskalering af de landsdækkende klimafremskrivninger fra 500m modellen ved hjælp af machine learning algoritmer (Random Forest). Denne metode blev valgt, fordi hverken en simpel interpolation fra 500m til 100m eller en ren topografi-baseret nedskalering, beskrevet i (Stisen, Schneider, et al. 2018), kan afspejle de komplekse detaljer en 100m model beskriver i sammenligningen med en 500m model. Desuden åbner Machine Learning metoden op for at nedskalere alle statistiske størrelser, f.eks. overskrivelsessandsynligheder, som ikke kan nedskaleres med en ren topografisk nedskalering.

Som træningsdata blev anvendt resultater fra fem udvalgte submodeller i 100m, som blev kørt med fem klimamodeller hver – dette svarer kun til ca. 2% af beregningstiden på hydrologiske modeller sammenlignet med at køre klimafremskrivninger med den landsdækkende hydrologiske model i 100m for alle 22 klimamodeller.

Nedskaleringen blev udført for en række klimabetingede ændringer i forskellige statistikker af dybden til det terrænnære grundvandsspejl (gennemsnitlig vandstand, Q01, Q99, 1m og 2m overskridelsessandsynligheder, T-hændelser), svarende til de statistikker der leveres fra 500m klimafremskrivningerne.

4.1. Introduktion til Random Forest (RF)

Til nedskalering er det anvendt en Random Forest (RF) regressor. Scripting foregik i Python med RF regression i scikit-learn library version 0.23.2. RF er en ensemble learning metode som kan benyttes til både klassifikation og regression. Den er baseret på et tilfældigt genereret ensemble af beslutningstræer. En RF regressor bliver anvendt til at prædiktere værdien af målvariablen (target) baseret på en række forklarende variable (covariates). Man træner en RF regressor baseret på træningsdata, som repræsenterer de sande værdier af target variablen. I træningen etablerer RF regressoren en sammenhæng mellem de forklarende variabler og target igennem dens beslutningstræer. Typisk kendes target variablen kun i begrænset omfang – men forudsat de forklarende variable kendes, kan en trænet RF regressor prædiktere værdien af target for et vilkårligt punkt hvor den ellers er ukendt.

Enhver trænet RF regressor skal opfattes som en specifik RF-model og anvendes kun for en specifik kombination af forklarende variable og target. Den største fordel ved en RF regressor i forhold til en lineær regressor er, at den kan håndtere mere komplekse, ikke lineære sammenhæng mellem forklarende variable og targets. Desuden kan RF metoden benyttes med en stor mængde forklarende

variable, idet metoden selv bestemmer hvilke variable der er de vigtigste, noget man ikke altid kan vurdere på forhånd.

4.2. Datagrundlag

GEUS bruger en række forklarende variable, som alle er til rådighed på landsdækkende kort i den ønskede opløsning på 100m (en oversigt er givet i Tabel 33). Target variablen er de simulerede ændringer for forskellige statistikker af grundvandsstanden i fremtiden, som skal prædikeres landsdækkende i 100m baseret på input fra de modelbasererede klimafremskrivninger i 500m (afsnit 2).

For at skabe træningsdata til RF regressors i 100m, er data fra simuleringer med fem udvalgte submodeller med fem udvalgte klimamodeller i 100m med fuld parameteroverførsel fra 500m for alle tre perioder (reference, nær og fjern fremtid) anvendt. For disse fem submodeller eksisterer dermed ændringer i grundvandsstanden i både 500m og 100m baseret på en hydrologisk model (dvs. vi har de "sande" værdier i både 500m og 100m). Dette tillader at træne RF regressors baseret på submodellerne. I næste skridt benyttes de trænede RF regressors til at prædiktere 100m ændringer på landsdækkende skala.

Tabel 33: Forklarende variabler (covariates) brugt i RF nedskaleringen. Alle variabler er tilgængelige landsdækkende i 100m opløsning.

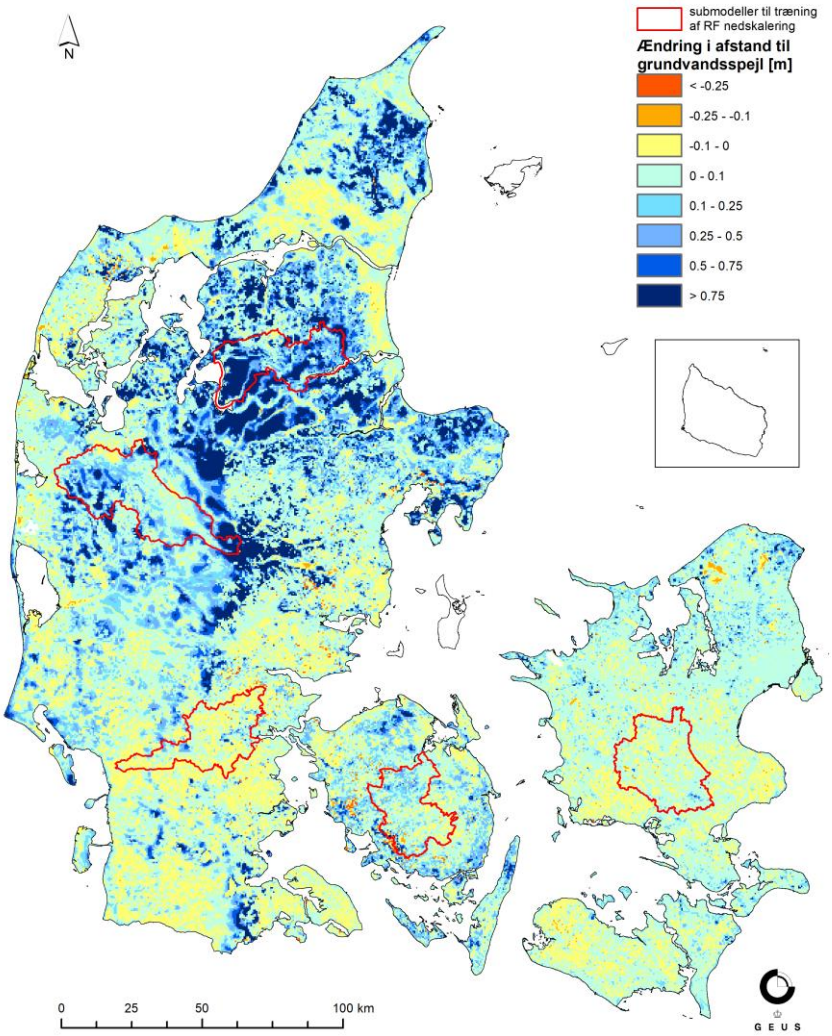
Faste covariates – topografi-relateret	
topo	Højde, kote i m.o.h.
topod1-5	Difference mellem højde i 500m og 100m opløsning
TWI	Topographic Wetness Index (Beven og Kirkby 1979)
slope	Hældning af terrænet
reltop2	Højden relativt til den gennemsnitlige højde i 200m omkreds
reltop5	Højden relativt til den gennemsnitlige højde i 500m omkreds
Faste covariates – modelparameter-relateret	
drain_d	Dræn dybde fra den nationale hydrologiske model
drain_tc	Dræn tidskonstante fra den nationale hydrologiske model
trh_lay<x>	Horisontal transmissivitet fra modellens lag 1 til lag 7
kh_mean_<x-xm>	Geometrisk gennemsnit af de horisontale hydrauliske ledningsevner for 6 dybdeintervaller: 2-5m, 5-10m, 10-15m, 15-20m, 20-25m (intervallet 0-2m svarer altid til det øverste lag, dvs. det er dækket af trh_lay1)
Variable covariates	
tbdv	"to-be-downscaled-variable", dvs. selve størrelse der skal nedskaleres (f.eks. ændring i gennemsnitlig dybde til grundvandsspejlet for fjern fremtid med RCP8.5). Interpoleret fra modellens 500m opløsning til 100m med bilineær interpolation
tbdv_hist	Absolut værdi fra den historiske periode (ikke reference af klimakørslerne!) hydrologiske model i 100m tilsvarende til tbdv (f.eks. den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet)

tbdv_hist_wd	Differencen mellem en tør og en våd historisk periode (tør: 1990 – 2001, våd: 2004 – 2015) tilsvarende til tbdv fra den historiske 100m hydrologiske modelkørsel (f.eks. den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet i den våde periode minus dybde i den tørre periode)

Valg af submodeller i 100m og klimamodeller

De anvendte klimamodeller er 2, 11, 13, 19 og 21 (Tabel 19). De fem submodeller, vist i Figur 40, blev udvalgt blandt de ti submodeller opstillet til submodelkalibreringen, se afsnit 1.1.7, baseret på ønsket om at afspejle så diverse billeder, som muligt af værdierne af de forklarende variable (f.eks. både områder med høj og lav hældning kombineret med både højt og dybt stående grundvandsspejl, samt små og store klimaændringer fra 500m modellen). På tilsvarende vis blev fem klimamodeller udvalgt blandt ensemblet af de 22 klimamodeller, Tabel 19.

Klimamodel 13 er en RCP4.5 klimamodel med en fremtidig nedbør som ligger omkring medianen af alle RCP4.5 klimamodeller. De øvrige fire klimamodeller er RCP8.5 klimamodeller, hvor den fremtidige nedbør i klimamodel 2 og 21 ligger omkring medianen af alle RCP8.5 klimamodeller. Afvigende herfra ligger den fremtidige nedbør over medianen i klimamodel 19, og under medianen i klimamodel 11.



Figur 40: De fem udvalgte submodeller til træning af RF regressorer: DK6 South, DK5 West, DK4 North, DK3 og DK1 South. Vist sammen med ændringen i den gennemsnitlige dybde til det øverste grundvandsspejl for fjern fremtid og RCP8.5 fra klimafremskrivningerne i 500m opløsning.

Opsætning af 100m submodel kørslerne

100m submodellerne blev kørt med en fuld parameteroverførsel fra 500m kalibreringen, for at skabe et så sammenligneligt grundlag som muligt i både 500m og 100m. 100m submodellerne blev kørt med dynamiske randbetingelser som daglige trykniveauer taget fra hver tilsvarende landsdækkende 500m klimakørsel. Hvert vandførende lag (dvs. hver sand- og kridtlag) i modellen er sat op med disse trykniveauer langs submodellernes rand. Trykniveauer indenfor modelområdet fra 500m klimakørslerne bliver ligeledes anvendt som initiale trykniveauer i 100m submodellerne, hvor trykniveaubilledet fra det første tidsskridt i hver periode angives som initiale trykniveauer i alle lag af submodellerne.

Anvendelsen af trykniveau randbetingelser fra 500m klimakørslerne medfører at et fuld hotstart som gennemført for 500m klimakørslerne ikke er nødvendig. I stedet blev anvendt ovennævnte initiale trykniveauer, kombineret med en forlænget opvarmningsperiode på fire år inden hver periode, dvs. kørslerne for reference perioder blev påbegyndt 01-01-1987, for nær fremtid 01-01-2037, og for fjern

fremtid 01-01-2067, mens udtræksperioden er uændret i forhold til Tabel 20. De tre ekstra år i opvarmningsperioden giver muligheden for at de simulerede trykniveauer fuldstændigt tilpasser sig fra de initiale trykniveauer fra 500m til 100m modellen.

4.3. Beskrivelse af RF-algoritme til nedskaleringen

Første forsøg med nedskaleringen af den absolutte dybde til grundvandsspejlet, samt en efterfølgende beregning af ændringerne baseret på differencen mellem de nedskalerede kort for forskellige perioder, var ikke succesfuldt: De absolutte værdier er typisk store i forhold til ændringerne, hvilket betyder at differencen mellem dem efter nedskaleringen er præget mere af usikkerhederne i nedskaleringen af de absolutte værdier og mindre af den faktiske ændring. Derfor blev det tidligt besluttet at fokusere på direkte nedskalering af ændringerne i grundvandsstanden mellem fremtidige periode og reference periode.

I alt blev der med RF modeller nedskaleret 236 forskellige ændringer fra 500m til 100m og den samlede statistik omfatter følgende leverancevariable:

- gennemsnitlig grundvandsstand (over hele perioden, samt for hver sæson og måned)
- Q01: en typisk høj grundvandsstand (over hele perioden, samt for hver sæson og måned)
- Q99: en typisk lav grundvandsstand (over hele perioden, samt for hver sæson og måned)
- Sandsynligheden for at grundvandsstanden overskrider hhv. 1 og 2 meter under terræn
- T-hændelser (2, 5, 10, 20, 50 og 100-årig): Høj grundvandsstand som statistisk set gentages hvert T'ende år.

for både

- nær fremtid (2041 – 2070)
- fjern fremtid (2071 – 2100)

og for medianen af klimamodellerne fra både

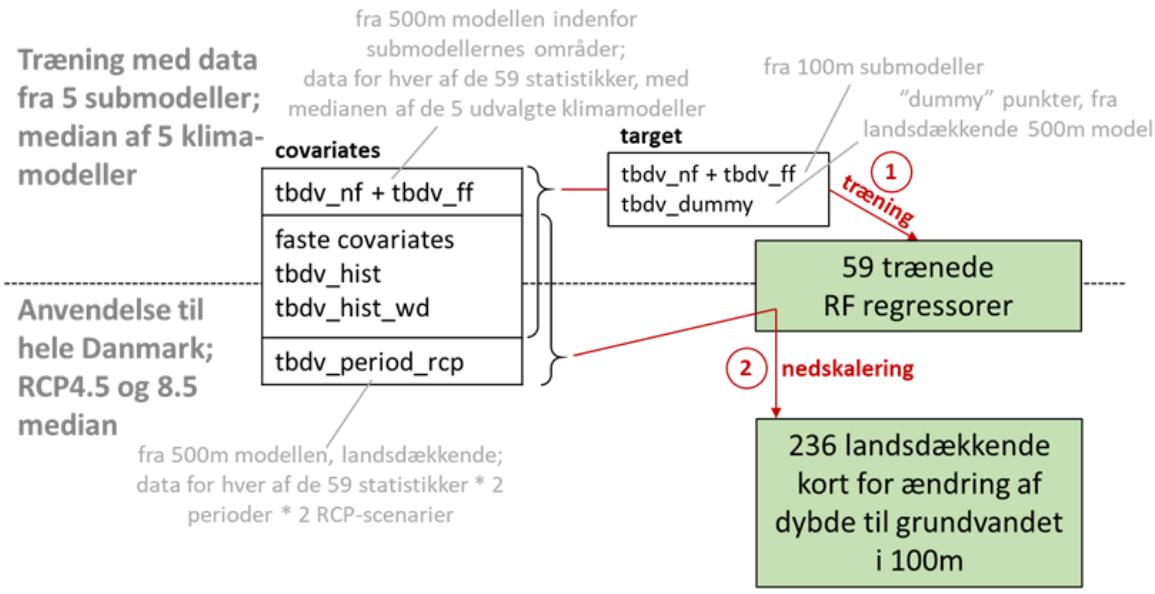
- RCP4.5 (fem klimamodeller)
- RCP8.5 (17 klimamodeller)

som giver 59 statistikker på ændringer, for hver to perioder og to RCP-scenarier, dvs. alt i alt 236.

Resultaterne fra træningsdatasættet, dvs. de simulerede grundvandsstand og ændringer fra 100m submodellerne blev udtrukket på sammen måde som resultater fra 500m klimafremskrivningerne, dog aggregeret til medianen på tværs af de fem udvalgte klimamodeller. På tilsvarende måde blev beregnet 500m datasæt baseret på medianen på tværs af de samme fem udvalgte klimamodeller.

Der blev kun trænet én RF regressor for hver af de 59 statistikker, dvs. den samme RF regressor blev brugt for både RCP4.5 og RCP8.5 og både nær og fjern fremtid for hver statistik, se Figur 41. Dette skyldes at vores træningsdata er begrænset til fem klimamodeller, som kun giver én median i træningen, samt at det viste sig at man øger robustheden af nedskaleringen ved at kombinere data fra

begge perioder i et træningsdatasæt. Desuden sikrer man på den måde, at den samme nedskaleringsmodel bliver anvendt på tværs af fremtidsperioder og RCP-scenarier, hvorved der sikres en ønsket og forventet konsistens i nedskaleringsresultaterne.



Figur 41: Flowchart der viser fremgangsmåden af RF regressorernes træning og anvendelse.

Støttepunkter (Dummy punkter)

RF-algoritmer er kendt for at være utilstrækkelige eller svage når det gælder ekstrapolation udover kombinationer af værdier af forklarende variabler og targets fra træningsdatasættet. På trods af det bevidste valg af de fem submodeller til træningsdatasættet, dækker de alligevel kun ca. 9,5% af hele landet, se Tabel 34, og langt fra alle kombinationer af forklarende variabler der forekommer på tværs af Danmark. Med andre ord kan det forekomme, at performance af en RF regressor falder betydeligt lige så snart den skal anvendes i områder, hvor de forklarende variables værdier ligger langt fra træningsdatasættet. Derfor blev træningsdatasættet suppleret med dummy punkter.

Disse dummy punkter blev udvalgt tilfældigt fra hele landet (undtaget arealerne dækket af de fem submodeller). For dummy punkterne bruger man alle faktiske værdier af forklarende variabler i hver punkt, og som target variablen i træning bruger man tbdv værdien fra 500m modellen (fordi den sande 100m værdi er ukendt). Med andre ord – i dummy punkterne nedskalerer man 500m tbdv "til sig selv". Det medfører at jo flere dummy punkter man bruger, jo tættere ville nedskaleringsproduktet ligge ved den (interpolerede) 500m tbdv. Dog har inklusionen af dummy punkterne den store fordel, at RF regressoren bliver væsentligt mere robust når den anvendes til hele landet.

I forskellige forsøg blev det undersøgt, hvor en god balance mellem den ønskede øgende robusthed og den uønskede interpolationseffekt kunne opnås. Resultatet endte med at der i alle statistikker (RF modeller) bliver der brugt 20.000 dummy punkter i træning, undtaget Q01, som viste sig at være mere udfordrende i nedskaleringen og viste sig at kræve brug af 100.000 dummy punkter.

Tabel 34: Overblik over antal af datapunkter i træningsdatasættet som del af det landsdækkende datasæt

	antal celler/datapunkter	% af total
submodeller i 100m	396.957	9,5%
dummy punkter	20.000	0,5%
dummy punkter, Q01	100.000	2,4%
DK i 100m	4.175.192	100%

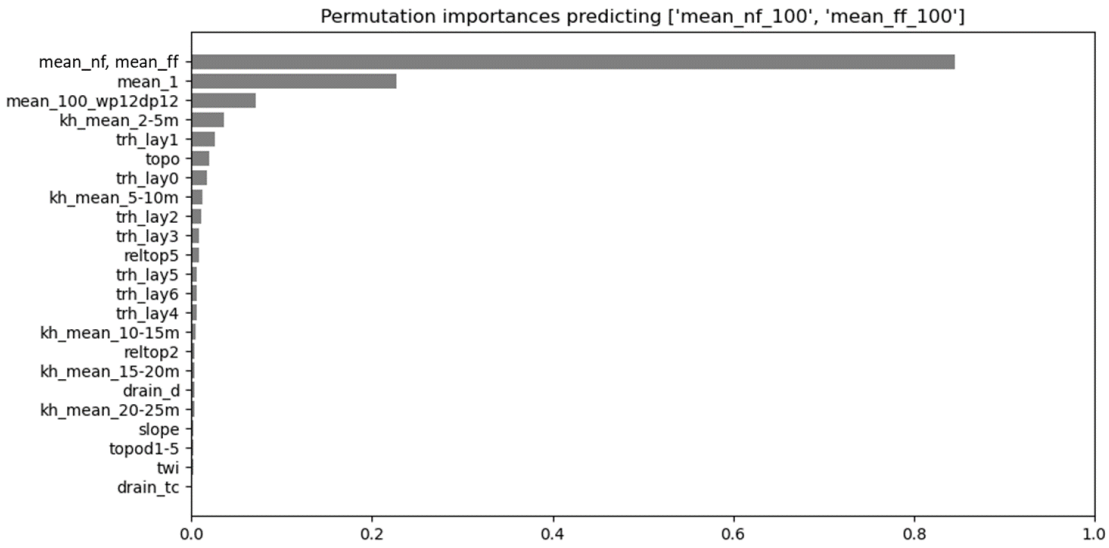
Fine-tuning af RF-algoritmer

Der er foretaget flere forskellige test for at optimere RF regressorerne til nedskaleringen, for eksempel blev forskellige antal dummy punkter, og forskellige sampling metoder til punkterne afprøvet. Disse test udmundede i de overfor nævnte antal af dummy punkter, samt en tilfældig sampling af dummy punkterne på tværs af hele landet.

Desuden blev der afprøvet en lang række forklarende variabler inklusiv f.eks. inddragelse af hydrauliske ledningsevner (i stedet for den hydrauliske transmissivitet) per modellag. Efter analyse af deres 'feature importance' (dvs. hvor meget de forskellige forklarende variabler bidrager til resultatet) i RF regressorerne blev den endelige liste besluttet, som er præsenteret i Tabel 33. Figur 42 viser et eksempel for feature importance for den endelige nedskaleringsmodel brugt til ændringen af den gennemsnitlige grundvandsstand. Det ses, at tbdv (dvs. den størrelse, som skal nedskaleres fra 500m til 100m opløsning, her: 'mean_nf, mean_ff') klart er den vigtigste forklarende variable. Dette er ikke overraskende, fordi der typisk er en (stærk) sammenhæng mellem ændringerne simuleret i 500m og 100m. En høj feature importance af tbdv betyder samtidigt, at nedskaleringsresultatet typisk vil følge tbdv tæt, hvilket sikrer konsistens mellem 500m modelresultater og 100m nedskaleringen, og øger tilliden til nedskaleringen også udenfor områderne af trænings-submodellerne.

Den næst vigtigste forklarende variable er den absolutte værdi for tbdv i 100m fra den historiske model (dvs. den absolutte gennemsnitlige grundvandsstand fra 100m historisk model, her: 'mean_1') og så differencen i tbdv mellem en våd og tør periode fra det historiske 100m model ('mean_100_wp12dp12'). Denne difference viser mønstre, som er sammenlignelige med ændringerne i klimafremskrivningerne, og indeholder derfor information som RF regressoren kan udnytte.

Først herefter kommer de faste forklarende variabler, dvs. forklarende variable der er baseret på topografien eller modellens parametrisering. I dette tilfælde er det den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne i intervallet 2 m til 5 m, transmissivitet i lag 2, terrænhøjden, transmissivitet i lag 1, osv. De specifikke feature importances varier fra tbdv til tbdv. Dog er det helt generelle billede at tbdv variablerne er de vigtige, dvs. Har højest feature importance.



Figur 42: Eksempel for feature importance for RF-nedskaleringen af ændringen af den gennemsnitlige grundvandsstand. Se også Tabel 33 for en forklaring af de forklarende variabler.

Som nævnt ovenfor, trænes RF regressorerne med en tbdv samt matchende target samtidigt for både nær og fjern fremtid. Dette sikrer ikke kun en ønsket konsistent nedskalering på tværs af begge perioder, men også øget robustheden af hver trænet RF regressor – deres prædikeringsevne for områder udenfor træningsdatasættet bliver øget, når de bliver trænet mod et større og mere diverst sæt af target punkter.

Til sidst blev der foretaget en hyperparameter search for RF regressorerne: Selve RF regressor har forskellige parameter eller indstillinger som bestemmer præcist hvordan beslutningstræerne bliver bygget op. Hyperparameter search resulterede i de optimale værdier vist i Tabel 35.

Tabel 35: RF regressor hyperparameters. For en mere udførlig forklaring henvises til https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestRegressor.html

parameter navn	forklaring	værdi
n_estimators	antal beslutningstræer i regressoren	200
max_depth	maksimale dybde af beslutningstræet	30
min_samples_split	minimum antal af samples for at splitte et node	5
max_features	antal af forklarende variabler som et split er baseret på	0.5*n_features
min_samples_leaf	krævet minimum antal af samples til et node	10
bootstrap	skal datasættet bootstrappes, dvs. bruges kun en del for hvert beslutningstræ?	True

Validering af RF-algoritme

Som udgangspunkt skal det nedskalerede 100m produkt være tættere på 100m modelresultatet (”sandheden”) end det tilsvarende 500m model resultat (efter rescaling og interpolation fra 500m til

100m), som er udgangsproduktet. Hvis ikke det nedskalerede produkt opfylder dette kriterie, har RF-algoritmen ikke bidraget til et bedre 100m produkt, og man bør bare bruge 500m modelresultatet i stedet for. Desuden skal de nedskalerede ændringerne ligge tæt på ændringerne fra udgangsproduktet i 500m, fordi vi generelt ser en god konsistens mellem de hydrologiske modeller i 500m og 100m, og formålet er først og fremmest at *nedskalere* 500m model resultater, ikke at lave en faktisk *prædiktion* af en 100m hydrologisk model.

Derfor blev alle nedskalerede ændringerne valideret på to forskellige måder:

- Validering 1: Direkte sammenligning af nedskaleringen med 100m model resultater (hvor disse findes, dvs. for de 5 submodel områder)
- Validering 2: Sammenligning af nedskaleringen med 500m model resultater (efter rescaling og interpolation til 100m) for hele landet

Validering 1 blev udført som en jackknifing test for submodellerne: Nedskaleringen blev kun testet på out-of-bag data, dvs. RF regressorerne blev skiftevis trænet med data fra fire submodeller, og testet mod den femte – ukendte – submodel. Dette blev gennemført i alt fem gange, så hver submodel bliver brugt som uafhængigt testdata én gang. Den slags test er vigtigt fordi en RF regressor typisk performer meget godt til prædiktionen af selve testdata (eller data, der ligner testdata meget), men godt kan vise udfordringer når den bliver brugt til at prædiktere data udenfor de kendte områder. Derfor er det vigtigt at bruge et helt andet, rumligt afskilt område som testdata, og ikke blot at dele træningsdata fra submodellerne tilfældigt i et trænings- og et testdatasæt, som ellers er en hyppigt benyttet metode.

Til de endelige RF regressorer, som blev brugt til at producere de endelige nedskalerede produkter, blev der dog anvendt træningsdata fra alle fem submodeller. Det betyder, at det kan forventes at de endelige RF regressorer performerer lidt bedre i nedskaleringen end jackknifing-testen indikerer fordi de blev trænet med et ca. 25% større datasæt.

Validering 2 blev udført på tværs af hele landet. Lige som i træningen af de endelige RF regressorer blev der også her brugt det fulde træningsdatasæt, dvs. alle fem submodeller. Evalueringen sker så på outputtet som disse RF regressorer leverer for hele landet.

En oversigt over performance for alle nedskalerede outputs er givet i Tabel 36. Denne tabel giver et overblik over alle statistikker, der blev nedskaleret. Valideringen 1 blev udført baseret på træningsdatasættet, som betyder at der findes kun én nedskaleret ændring for hver nær og fjern fremtid.

Validering 2 blev udført baseret på det færdige datasæt, som betyder at der findes én nedskaleret ændring for både RCP4.5 og RCP8.5 for hver nær og fjern fremtid. For validering 1 er der givet Pearson's correlation coefficient ("R") mellem de nedskalerede 100m ændring og den faktiske 100m ændring fra kørslerne af den hydrologiske model for submodellerne i 100m, som en gennemsnit på tværs af dem fem jackknifing tests med de fem submodeller. En Pearson's correlation R-værdi kan højst være 1, som indikerer en perfekt korrelation, og 0 svarer til ingen korrelation. Den næste kolonne "dif R" giver differencen mellem denne R-værdi og R-værdien mellem den interpolerede 500m

ændring fra den hydrologiske model i 500m opløsning (udgangsproduktet) med den tilsvarende ændring fra den hydrologiske model i 100m.

Positive værdier (vist med grønne og gule farver) betyder, at 100m nedskaleringen korrelerer mere med 100m modelresultater end 500m modelresultater gør. Dette anses som en succesfuld nedskalering. Med andre ord betyder det at 100m nedskaleringen reproducerer nogen af de finere detaljer i grundvandsspejlets udvikling, som ellers forsvinder ved aggregeringen til 500m modelgrid.

For validering 2 er der angivet den gennemsnitlige fejl på tværs af alle gridceller på tværs af hele landet (”ME”) mellem den nedskalerede ændring i 100m og udgangsproduktet i 500m. Vores mål er at holde ME så lille som muligt. Dog viser selv en sammenligning af de hydrologiske simuleringer i 500m og 100m allerede en vis afvigelse eller bias for forskellige størrelser. Derfor viser vi i kolonnen ”dif ME”, hvor meget ME i 100m nedskalerede produkt afviger fra den ME, man ser mellem de hydrologiske simuleringer i 500m og 100m. Jo mindre den afvigelse (farvet i grøn), jo bedre nedskaleringen.

Enhederne her er i meter for alle størrelser bortset fra d1mut og d2mut, som er overskridelsessandsynligheder uden enhed (værdier mellem 0 og 1).

Resultaterne er tilfredsstillende og næsten alle størrelser kunne blive nedskaleret succesfuldt. Der er kun enkelte undtagelser i nogen enkle ændringer, f.eks. Q01 og Q99 (høje og lave grundvandsstande) kunne ikke nedskaleres helt overbevisende baseret på deres relativ lille forbedring i R (værdier i kolonnen ”dif R” som er tæt på nul). Dette sker typisk for de variable, hvor 500m og 100m simuleringerne ikke ligner hinanden meget (lave R værdier) og dermed reduceres mulighederne for at nedskalere succesfuldt. Der forekommer ingen negative ændringer og derfor vurderes det muligt at gennemføre nedskaleringen på tværs af alle variable.

Den generelle konsistens mellem 500m modelresultaterne, som er vores udgangsprodukt, og 100m nedskaleringen er også givet ved at selv de største afvigelser i ME ligger under 10 cm for T-hændelser, og for alle andre statistikker ligger de under 5 cm.

Tabel 36: Oversigt over RF nedskalerings performance. Forklaring i teksten ovenfor.

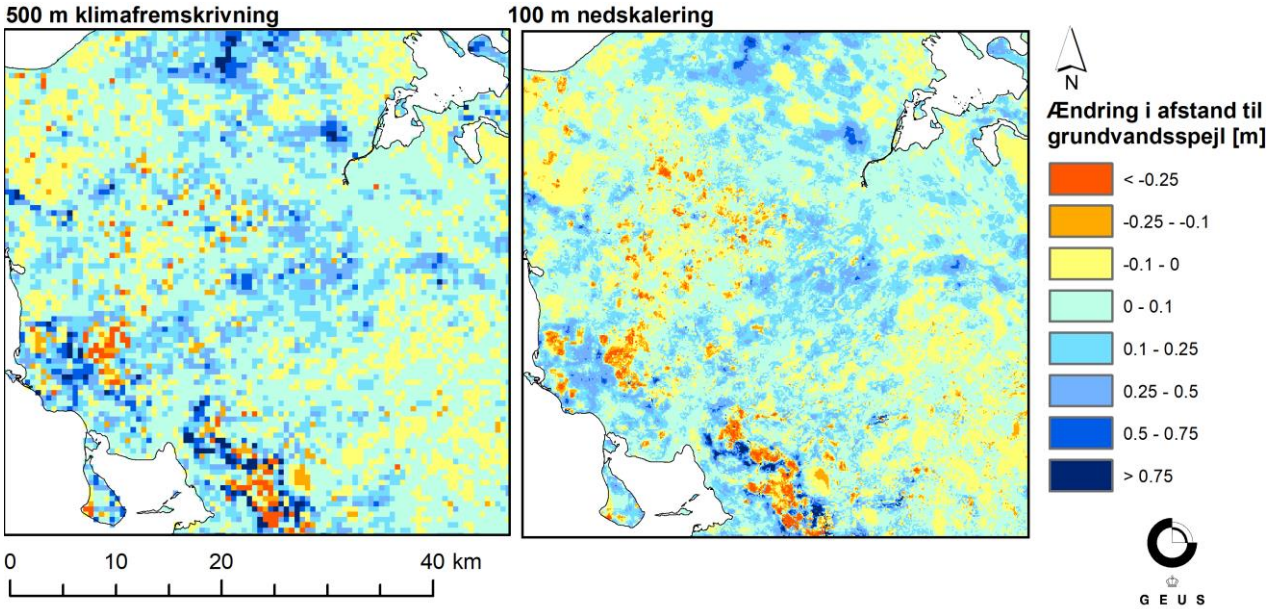
	validering 1 - sammenligning med 100m submodellerne				validering 2 - sammenligning med 500m for hele landet							
					RCP4.5				RCP8.5			
	nær fremtid		fjern fremtid		nær fremtid		fjern fremtid		nær fremtid		fjern fremtid	
	R	dif R	R	dif R	ME	dif ME	ME	dif ME	ME	dif ME	ME	dif ME
mean	0.72	0.09	0.78	0.09	-0.006	0.015	-0.006	0.009	-0.006	0.014	0.025	0.022
mean_spring	0.63	0.09	0.80	0.12	-0.012	0.017	-0.010	0.010	-0.010	0.016	0.025	0.026
mean_summer	0.60	0.07	0.72	0.11	-0.008	0.013	-0.009	0.010	-0.008	0.014	0.026	0.025
mean_autumn	0.59	0.07	0.67	0.08	0.000	0.016	-0.007	0.015	0.001	0.015	0.023	0.015
mean_winter	0.79	0.12	0.79	0.13	-0.021	0.020	-0.021	0.017	-0.019	0.018	0.029	0.033
mean_jan	0.76	0.13	0.82	0.15	-0.022	0.018	-0.023	0.014	-0.025	0.021	0.024	0.033
mean_feb	0.75	0.14	0.82	0.17	-0.035	0.024	-0.039	0.022	-0.033	0.022	0.012	0.030
mean_mar	0.48	0.00	0.77	0.14	-0.014	0.017	-0.015	0.012	-0.014	0.018	0.025	0.029
mean_apr	0.64	0.13	0.79	0.11	-0.012	0.019	-0.009	0.009	-0.009	0.015	0.024	0.024
mean_may	0.59	0.11	0.77	0.11	-0.013	0.018	-0.010	0.011	-0.008	0.014	0.028	0.027
mean_jun	0.53	0.10	0.76	0.10	-0.013	0.017	-0.009	0.007	-0.010	0.015	0.026	0.028
mean_jul	0.56	0.08	0.70	0.11	-0.008	0.013	-0.010	0.008	-0.010	0.014	0.026	0.027
mean_aug	0.52	0.02	0.62	0.05	0.000	0.009	-0.005	0.013	-0.003	0.012	0.030	0.023
mean_sep	0.57	0.06	0.60	0.05	0.008	0.007	0.005	0.004	0.005	0.010	0.030	0.022
mean_oct	0.52	0.06	0.60	0.05	0.008	0.013	-0.002	0.015	0.004	0.017	0.025	0.012
mean_nov	0.55	0.05	0.66	0.09	-0.006	0.018	-0.020	0.030	-0.002	0.014	0.022	0.013
mean_dec	0.63	0.07	0.70	0.09	-0.016	0.023	-0.012	0.017	-0.012	0.019	0.034	0.028
d1mut	0.59	0.27	0.59	0.29	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.006	0.007
d2mut	0.43	0.20	0.58	0.31	-0.001	0.001	-0.001	0.001	-0.001	0.002	0.005	0.005
Q01	0.36	0.08	0.50	0.09	-0.028	0.018	-0.025	0.014	-0.026	0.016	0.004	0.014
Q01_spring	0.38	0.06	0.50	0.06	-0.016	0.010	-0.014	0.028	-0.017	0.010	-0.006	0.020
Q01_summer	0.24	0.04	0.47	0.11	-0.026	0.017	-0.024	0.010	-0.030	0.021	-0.015	0.001
Q01_autumn	0.24	0.03	0.32	0.05	-0.018	0.010	-0.017	0.024	-0.018	0.010	-0.010	0.017
Q01_winter	0.33	0.08	0.46	0.08	-0.039	0.018	-0.032	0.031	-0.037	0.016	-0.001	0.061
Q01_jan	0.32	0.05	0.47	0.08	-0.016	0.013	-0.011	0.008	-0.009	0.006	0.011	0.014
Q01_feb	0.39	0.08	0.50	0.08	-0.056	0.041	-0.040	0.013	-0.073	0.024	-0.040	0.014
Q01_mar	0.32	0.05	0.54	0.06	-0.010	0.000	-0.014	0.044	-0.011	0.001	0.008	0.022
Q01_apr	0.33	0.03	0.52	0.08	-0.016	0.014	-0.011	0.026	-0.016	0.015	-0.001	0.016
Q01_may	0.37	0.08	0.45	0.03	-0.020	0.009	-0.012	0.021	-0.021	0.010	-0.006	0.016
Q01_jun	0.27	0.08	0.45	0.11	-0.032	0.014	-0.029	0.014	-0.036	0.018	-0.024	0.009
Q01_jul	0.21	0.04	0.44	0.08	-0.017	0.015	-0.023	0.011	-0.023	0.021	-0.006	0.005
Q01_aug	0.26	0.02	0.41	0.07	-0.018	0.013	-0.015	0.016	-0.018	0.013	-0.006	0.007
Q01_sep	0.25	0.03	0.35	0.02	-0.004	0.011	-0.001	0.048	0.014	0.007	0.024	0.023
Q01_oct	0.27	0.03	0.29	0.04	-0.016	0.004	-0.016	0.005	-0.025	0.013	-0.023	0.013
Q01_nov	0.27	0.02	0.41	0.05	-0.017	0.026	-0.018	0.017	-0.017	0.026	-0.016	0.014
Q01_dec	0.33	0.05	0.47	0.07	-0.026	0.035	-0.018	0.005	-0.021	0.030	-0.009	0.014
Q99	0.34	0.08	0.40	0.05	0.027	0.029	0.010	0.003	0.014	0.016	0.022	0.010
Q99_spring	0.37	0.06	0.22	0.04	0.019	0.024	0.013	0.016	0.003	0.008	0.004	0.007
Q99_summer	0.39	0.09	0.27	0.03	0.010	0.023	0.001	0.006	0.001	0.014	0.009	0.014
Q99_autumn	0.23	0.05	0.36	0.05	0.034	0.028	0.021	0.009	0.018	0.011	0.027	0.015
Q99_winter	0.27	0.09	0.31	0.05	0.022	0.028	-0.002	0.002	-0.003	0.002	0.012	0.012
Q99_jan	0.26	0.09	0.26	0.11	0.015	0.032	-0.050	0.044	-0.052	0.036	0.011	0.017
Q99_feb	0.38	0.22	0.38	0.18	-0.009	0.008	-0.053	0.029	-0.034	0.017	-0.041	0.018
Q99_mar	0.30	0.03	0.25	0.06	-0.003	0.021	-0.010	0.006	0.001	0.025	0.004	0.020
Q99_apr	0.34	0.03	0.23	0.07	0.040	0.050	0.010	0.015	-0.002	0.008	-0.001	0.004
Q99_may	0.40	0.08	0.25	0.05	0.002	0.014	-0.010	0.006	-0.008	0.004	0.002	0.005
Q99_jun	0.36	0.15	0.24	0.06	0.002	0.008	-0.001	0.001	-0.003	0.004	0.010	0.010
Q99_jul	0.33	0.11	0.23	0.04	0.008	0.019	0.000	0.006	-0.002	0.009	0.006	0.012
Q99_aug	0.38	0.09	0.29	0.06	0.011	0.023	0.002	0.017	-0.001	0.010	0.007	0.022
Q99_sep	0.28	0.09	0.34	0.05	0.025	0.031	0.012	0.008	0.007	0.013	0.015	0.011
Q99_oct	0.20	0.03	0.36	0.04	0.030	0.023	0.018	0.005	0.014	0.006	0.024	0.011
Q99_nov	0.31	0.05	0.35	0.05	0.030	0.017	0.018	0.001	0.022	0.009	0.031	0.012
Q99_dec	0.29	0.06	0.29	0.05	0.023	0.015	0.012	0.001	0.017	0.009	0.028	0.016
T2	0.64	0.21	0.73	0.22	-0.062	0.037	-0.060	0.010	-0.050	0.025	0.004	0.054
T5	0.64	0.21	0.73	0.20	-0.079	0.047	-0.078	0.027	-0.061	0.029	-0.002	0.049
T10	0.60	0.18	0.70	0.19	-0.093	0.051	-0.098	0.047	-0.070	0.028	-0.007	0.044
T20	0.54	0.15	0.67	0.20	-0.111	0.055	-0.124	0.078	-0.080	0.023	-0.017	0.030
T50	0.46	0.13	0.63	0.21	-0.116	0.069	-0.134	0.093	-0.077	0.030	-0.020	0.020
T100	0.40	0.11	0.58	0.20	-0.109	0.093	-0.126	0.085	-0.062	0.047	-0.024	0.017

På de efterfølgende kort er vist eksempler for nedskaleringen til 100m, sammenlignet med det tilsvarende 500m modelresultat (som tjener som udgangsprodukt eller to-be-downscaled variable i nedskaleringen). Dette giver et indtryk af, hvor tæt 100m nedskaleringen følger 500m modelresultaterne, samt hvilke rumlige detaljer der først træder frem i den finere 100m opløsning.

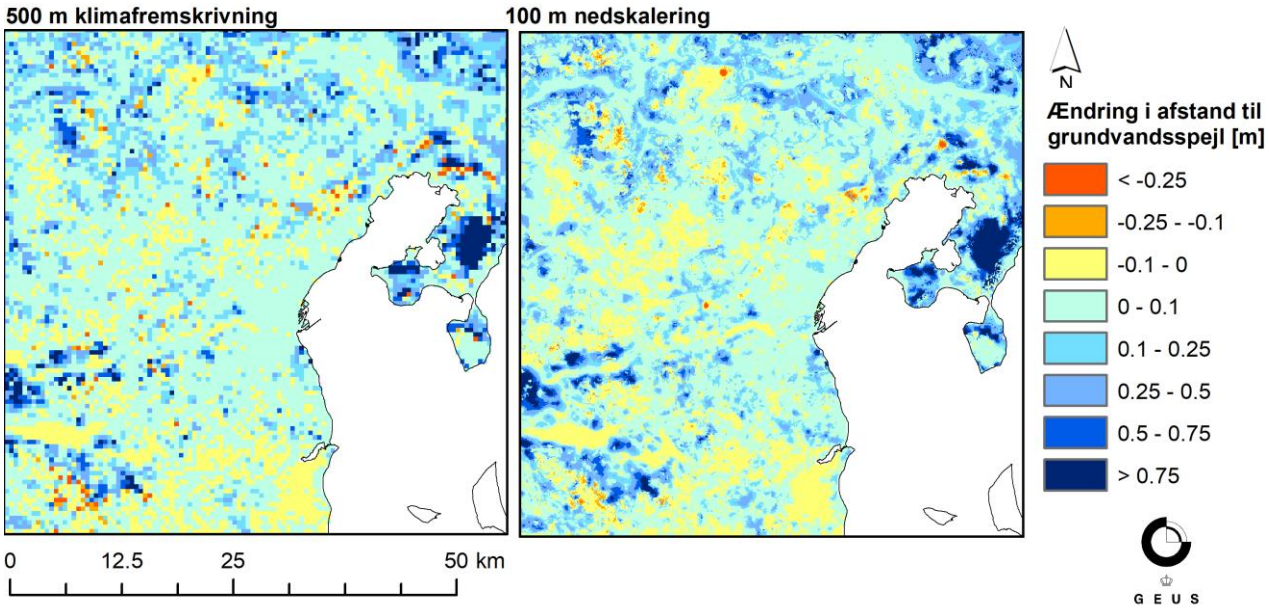
Figur 43 viser ændringen i den gennemsnitlige dybde til det terrænnære grundvand for et udsnit af Fyn, i fjern fremtid med RCP8.5 scenario. Her ses, at 500m modelresultater og 100m nedskaleringen er samstemmende mht. at prædikere en dominerende tendens til stigning i vandspejlet, samt i det overordnede rumlige mønster. Derudover træder de rumlige detaljer meget bedre frem i 100m nedskaleringen, særligt på Sydvestfyn. Udformningen af de detaljerede ændringer skyldes antagelsesvis mest topografien samt geologien i det øverste lag. Begge informationer foreligger i den finere 100m opløsning, og er derfor aggregeret i 500m modellen, som udligner nogen variation som indeholder informationsværdi.

Figur 44 viser den samme ændring i det gennemsnitlige grundvandsspejl, dog i nær fremtid og for et område i Jylland omkring Aarhus. Igen kan det ses, at både 100m og 500m stemmer overens i deres generelle mønstre, dog træder mange detaljer, som formodes primært at skyldes f.eks. topografien, meget bedre frem i 100m (se f.eks. dalene i den nordøstlige og sydvestlige del af udsnittet).

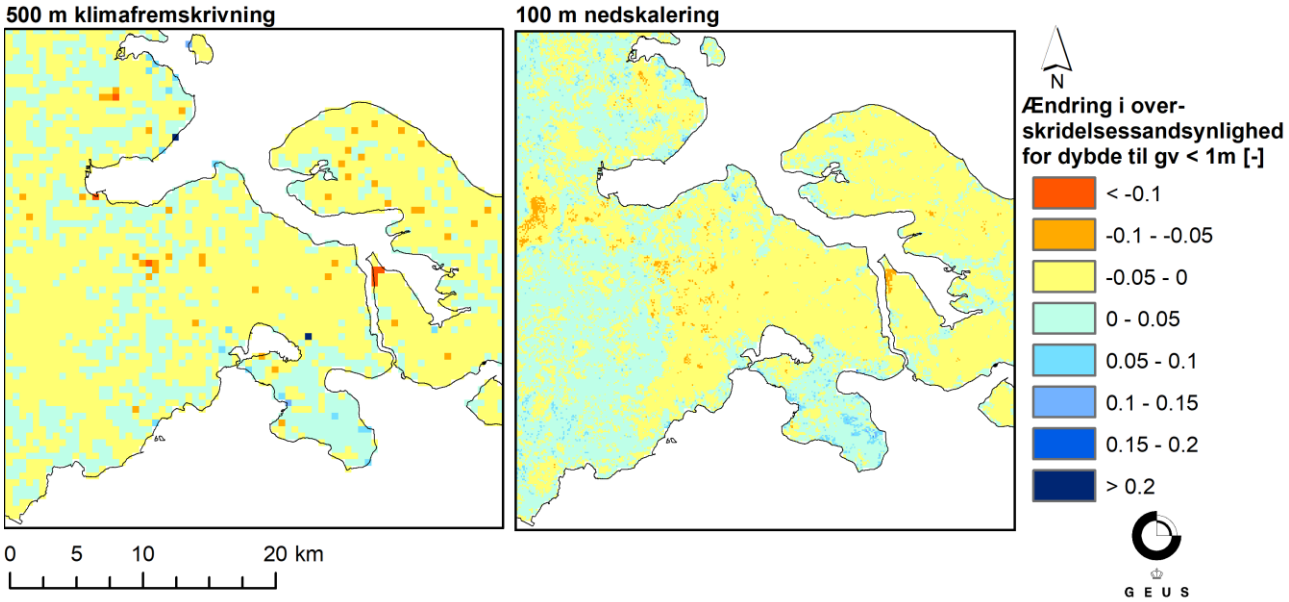
Figur 45 viser ændringen i overskridelsessandsynligheden for grundvandsspejlet tættere på terræn end 1m, for den fjerne fremtid og RCP4.5. Her kan ses, at der er mindre forskelle mellem 100m og 500m og 500m ændringerne viser en marginalt faldende overskridelsessandsynlighed i de sydvestlige områder af udsnittet, mens 100m ændringerne viser marginalt stigende overskridelsessandssynligheder i store dele af samme området. Her kan der være tale om nogle generelle afvigelserne som ikke nødvendigvis skyldes selve nedskaleringen og input opløsning. Formentlig har nogle af disse forskelle deres oprindelse i generelle forskelle i klimasimuleringen af det terrænnære grundvandsspejl, som ses mellem den hydrologiske model i 500m og 100m (sammenlignet i afsnit 1.3.1).



Figur 43: Eksempel for ændring i dybden til det terrænnære grundvand på Fyn. Ændring i perioden 2071 - 2100, for RCP8.5. Ændringer i meter, som fremtid - reference. Til venstre: 500m hydrologisk model. Til højre: Nedskaleret til 100m.



Figur 44: Eksempel for ændring i dybden til det terrænnære grundvand på Jylland (omkring Aarhus). Ændring i perioden 2041 - 2070, for RCP8.5. Ændringer i meter, som fremtid - reference. Til venstre: 500m hydrologisk model. Til højre: Nedskaleret til 100m.



Figur 45: Eksempel for ændring i sandsynligheden at det terrænnære grundvand står mindre end 1 m under terræn på Sønderjylland (mellem Aabenraa og Sønderborg). Ændring i perioden 2071 - 2100, for RCP4.5. Ændringer i meter, som fremtid - reference. Til venstre: 500m hydrologisk model. Til højre: Nedskaleret til 100m.

5. ML baseret estimering af dybde til terrænnært grundvand

HIP4Plus projektet har til formål at kortlægge dybden til det terrænære grundvand i 10 m rumlig opløsning. HIP4Plus bygger videre på erfaringerne fra C2C projektet (Koch 2019) hvor GEUS, i samarbejde med COWI og SCALGO, udviklede et maskinlærings-(ML) modelbaseret værktøj til simulering af grundvanstanden i høj rumlig opløsning.

Fordelen med ML tilgangen er at opnå en rumlig opløsning, som ellers ikke ville være mulig med en proces-baseret model, som DK-Modellen. I HIP4Plus benyttes DK-model HIP i 100m grid samt ML til at estimere dybden til det terrænnære grundvand i 10m rumlig opløsning. Ulempen ved DK-modellen er, at man kun kan simulere en meget forsimplet tidsdimension, som skyldes at datagrundlaget til dels er for ringe til at beskrive den tidslige dynamik med en datadrevet model alene, samtidig med at beregningstiden bliver meget lang, pga. at der simuleres daglige grundvandsstand i meget høj opløsning. C2C projektet simulerede en ekstremt høj grundvandsstand. I HIP4Plus valgte vi at simulere to tidslige snapshots af dyden til det terrænnære grundvand, dels en typisk vintersituation og dels en typisk sommersituation, samt angivelser af usikkerheder.

5.1. Datagrundlag

Datagrundlaget til beregning af dybden til det terrænnære grundvand med ML består af en række forklarede variabler, som findes som landsdækkende kort samt angivelser af observationer, som ML modellen bliver trænet imod.

I HIP4Plus ML modellen findes to observationssæt, en typisk sommer og en typisk vinter dybde-til-det-terrænnære-grundvand. For at beskrive sommertilstanden bruger vi alle pejlinger fra sommermånederne (juni, juli og august) for hele 30 års perioden (1990 - 2019). Månederne december, januar og februar er udvalgt til at repræsentere den typiske vintertilstand. ML modellen kan kun håndtere en enkelt observation for hhv. sommer- og vintertilstand for hver boring. Hvis en boring har flere vinter- eller sommerpejlinger bliver medianen beregnet. ML modellen bruger som udgangspunkt den samme pejledatabase, som anvendes i kalibrering og validering af DK-Model HIP. Databasen blev udvidet med pejlinger fra øerne, som ikke er inkluderet DK-modellen, for eksempel Samsø og Anholt, fordi ML modellen skal prædiktere grundvandsdybden landsdækkende.

For at kunne beskrive dybden til det øverste grundvandsspejl på tværs af landet, benyttes information om pejlingens grundvandsspejl, dybden til pejlingens indtag (filtermidtpunkt), samt hvilken jordartsklasse fra jordartskortet som indtaget er placeret i. Motivation for denne fremgangsmåde er at det øverste grundvandsspejl typisk vil ligge i varierende jordarter. Dybde-tærskelværdierne angiver hvorvidt en pejling repræsenterer det øverste vandspejl ud fra dybden til grundvandsspejlet i pejlin-

gens indtag, samt hvilken jordartsklasse som indtaget står i. Dybde-tærskelværdierne for hver jordartsklasse er vist i Tabel 37. Fx vil en boring med et indtag i 10m dybde ikke være repræsentativ for moræneler, da man ville forvente det øverste vandspejl ligger tættere på terræn (i de øverste par meter). På den anden side er en sådan boring antageligt en pålidelig observation for sandede områder. Værdierne i tabellen er afledt af den simulerede 90 % fraktil dybde af 100m modellen beregnet for hver jordartsklasse. Tærskel-dybderne er generelt dybere for de sandede jorde, men ligger tæt på terræn for lerholdig jord.

Tabel 37: Angivelse af dybde tærskelværdier anvendt for udvælgelsen af boringer for træningsdatasæt.

Jordart	max dybde (filter og pejling)
Sand og fint sand	15
Moræneler	20
Tørv og gytje	3
Kalk og grundfjeld	20
Ukendt	3
Moræneler	3
Groft sand og grus	10
Saltvandssand	3
Silt og ler	3

Efter anvendelsen af dybde-tærskelværdierne er udvalgt i alt 12.987 boringer. Disse boringer har enten en sommer- eller en vinterpejling, eller både sommer- og vinterpejlinger. Kun 1.378 boringer har både en sommer- og vinterpejling.

For at udvide træningsdatasættet og for at have konsistens mellem sommer- og vintermodellen, dvs. at have både en sommer-og vinterpejling i hver boring, anvendes en gap-filling procedure til at estimere grundvandsstanden i den manglende sæson. I gap-filling proceduren tages udgangspunktet i den rumligt distribuerede sæsonvariation (amplituden) simuleret med DK-Model HIP i 100m grid, hvor boringen er placeret. I få tilfælde opstår urealistiske høje simulerede sæsonvariationer og variationer over 2m er derfor sat til 2m. Manglede vinterpejlinger bliver beregnet som sommerdybden af grundvandsspejlet fratrukket sæsonvariationen og manglede sommerpejlinger bliver beregnede som vinterdybden plus sæsonvariationen.

Ligesom i DK-Model HIP kalibrering bruger ML modellen også de 19.074 søer til træning. Udover pejlinger og søer indeholder træningsdatasættet også støttepunkter, der repræsenterer en grundvandsdybde lig med 0m, hvor der er placeret 1.000 tilfældige støttepunkter i hhv. større vandløb og langs kysten (2000 punkter i alt). Denne procedure bygger på erfaringer fra C2C projektet.

Tabel 38 giver en oversigt af hvordan træningsdatasættet, i alt 34.061 pejlinger, er sammensat.

Tabel 38: Opgørelsen af træningsdataset.

Data type	antal
Boring (både sommer og vinter)	1378
Boring (sommer gap-filled)	5620
Boring (vinter gap-filled)	5989
Søer	19074
Kystlinje	1000
Vandløb	1000
i alt	34061

Tabel 39 angiver de statistiske størrelser for de udvalgte pejlinger i træningsdatasættet. Sæsonvariationen er beregnet til cirka 40cm på baggrund af medianværdier. Formålet med denne tabel er at evaluere effekten af den valgte gap-filling metode. Da medianværdierne af målte vinter- og sommergrundvanstande er ret tæt på de gap-filled data og konkludere det at statistikken for de målte pejlinger er sammenlignelig med statistikken af de korrigeret pejlinger.

Tabel 39: Udvalgte statistiske størrelser for træningsdataset. Værdier angivet i meter under terræn.

	vinter pejl	sommer pejl	vinter gap-filled	sommer gap-filled
middel	3.29	3.52	2.93	3.77
median	2.20	2.62	2.09	2.68
min	0.00	0.11	0.00	0.17
max	19.12	19.19	18.79	19.04
std	2.90	2.72	2.59	2.88

ML modellen inkorporerer desuden i alt 14 forklarende variabler, som er udvalgt efter erfaringer fra C2C projektet. I Tabel 40 ses en oversigt over de 14 anvendte forklarende variable. Disse variabler indeholder rumlige informationer af de fysiske jordegenskaber, topografien, geologien, arealanvendelsen og hydrologiske forhold. Blandt andet ses den typiske sommer- og vinter grundvandsstand der er beregnet på baggrund af DK-Model HIP i 100m grid. Et kort over typiske sommerdybde er beregnet som medianen af 30 median kort for månederne juni, juli og august af et givent år. Kortet der viser en typisk vinterdybde er beregnet som medianen af 30 værdier fra median kort for månederne december, januar og februar for en given vintersæson. Landskabselementer, det binære vandtema, som angiver vand på terræn, og arealanvendelsen er kategoriske kort, mens resten af de forklarende variable er numeriske værdier. Kortene over den horisontale og vertikale afstand er beregnet i forhold til det binære vandtema, som indeholder søerne, vandløbsnetværket (fra DK-Model HIP 100m's Mike Hydro modellen) og kystlinjen.

Tabel 40 Oversigt over de 14 anvendte forklarende variabler med angivelse af datakilde.

Variable	Forklaring	Reference
LerA	Ler indholdet; a lag: 0–30 cm	(Adhikari 2013)
LerB	Ler indholdet; b lag: 30–60 cm	
LerC	Ler indholdet; c lag: 60–100 cm	
LerD	Ler indholdet; d lag: 100–200 cm	
Ler Tykkelse	Akkumuleret lerlag tykkelse fra terræn	(Stisen, Ondracek, et al. 2019)
Landskabsele-menter	DCA, Den Danske Jordklassificering	(DCA, Den Danske Jordklassificering 2014)
DHM	Højdemodel	SDFE
Horisontal Af-stand	Horisontal afstand til binært vandtema	
Vertikal Af-stand	Vertikalt afstand til binært vandtema	
Hældning	Terrænhældning	
Befæstelses-grad	Andel af et område, som er belagt	
Binært Vand-tema	Indeholder søer, kyst, vandløbstema (HIP model)	FOT
Arealanven-delse	forsimplet arealanvendelse	HIP arealanvendelse
DTP (vin-ter/sommer)	typisk sommer/vinter tilstand af dybde til grundvands-stand simuleret fra HIP model	HIP 100m model

5.2. Modelspecifikationer

Det benyttes en ML algoritme som bygger på beslutningstræer. Beslutningstræer er en populær metode indenfor ML der lærer at strukturere data. Her anvendes denne metode sammen med gradient boosting til prædiktion af grundvandsstand. Gradient boosting er en ML teknik som kan bruges til regressions- og klassificeringsopgaver. Der produceres en model i form af et ensemble af beslutningstræer. Ensemblet består af mange 'svage beslutningstræer' som hver for sig har en dårlig prædiktionsevne. I gradient boosting bliver ensemblet bragt sammen med en sumfunktion til den endelig prædiktion og for hvert ekstra beslutningstræ der inddrages forsøger ML algoritmen at korrigere residualen af summen på de forrige træer.

I HIP4Plus trænes i alt 6 ML modeller. En for en typisk sommer og en for en typisk vinter tilstand. Sommer- og vintermodellerne bruger en middel absolut fejl (MAE) som objektivfunktion i selve træningen. Usikkerhed af de to modeller skal kunne beskrives med en nedre (lower) og en øvre (upper)

konfidensinterval. Hvert usikkerheds bånd skal trænes med sin egen model. Til træning af usikkerheds båndene anvender vi en quantile objektiv funktion. Her er valgt en q10 og en q90 fraktil som giver en konfidensinterval svarende til 80%. Hvert usikkerhedsbånd har sin egen model. Dvs. vinter q10, vinter q90, sommer q10, sommer q90.

På baggrund af n (antallet) af simulerede (sim) og observerede (obs) grundvandsdybder beregnes MAE således:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} |sim_i - obs_i|}{n}$$

Quantile objektive funktionen beregnes for et valgt fraktil (q) således:

$$Quantile = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(q - 1 \cdot (obs_i \leq sim_i)\right) \cdot (obs_i - sim_i)}{n}$$

En 0.1 fraktil kan forstås som en angivelse af, at 10% af prædiktionen er under de observerede grundvandsdybder. Dvs. modellen overprædiktere 90% af gangene. Objektiv funktionen giver mere vægt (0.9) til overestimeringer og mindre vægt (0.1) til underestimeringer. En fraktil 0.9 er dermed en angivelse af, at 90% af prædiktionerne er under observationerne, fordi mere vægt (0.9) bliver lagt på underestimeringer af modellen. q10 modellerne for sommer og vinter tilstand kan derfor bruges som et terrænnært konfidensinterval og q90 beskriver det dybe usikkerhedsbånd.

Til selve implementeringen af gradient boosting algoritmen med beslutningstræer anvendes CatBoost biblioteket i python (version 0.24.3). CatBoost er velegnet til store datasæt og kan nemt håndtere både numeriske og kategoriske variable automatisk.

5.3. Modelopsætning

En CatBoost model er styret af en række parametre som angiver hvordan arkitekturen af beslutningstræer er defineret og hvordan modellen er regulariseret, dvs. hvordan overfitting er undgået. Her er parameter tuning gennemført i to faser. I første omgang blev de følsomme parametre identificeret manuelt og en realistisk parameter værdi blev etablerede med en 'trial and error' tilgang. Efterfølgende blev en mere stringent parameter tuning gennemført. Til det formål blev træningsdatasættet opdelt i 75% træningsdata og 25% testdata. En "randomized grid search" blev kørt på de 75% for at finde et optimalt parametre sæt. Her testes et antal parameter kombinationer som blev trukket tilfældigt ud udfra en foruddefineret pulje. Hver parameter kombination bliver testede med en 3-fold krydsvalidering og middelværdien af de 3 modeller bliver gemt. Til sidst kan det tilbageholdte uafhængige test datasæt (25%) anvendes som validering. De forud definerede værdier for de 9 valgte CatBoost parametre er angivet i Tabel 41. På grund af beregningstiden er det ikke hensigtsmæssigt at køre alle ~1,000,000 mulige parametre kombinationer.

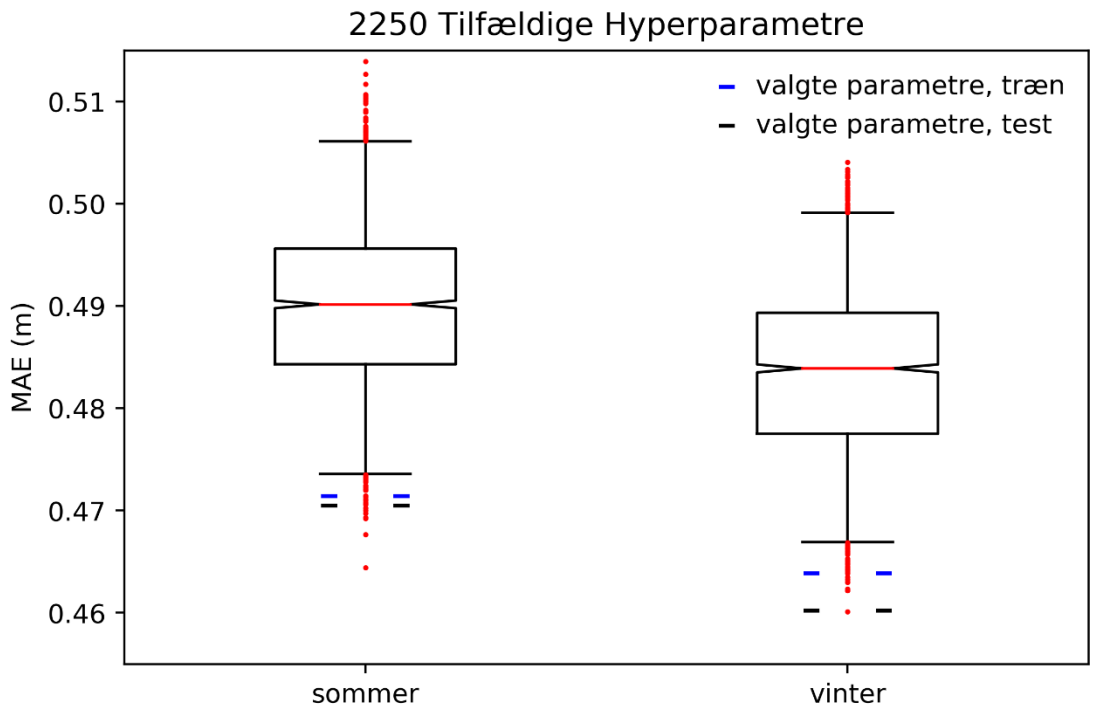
Tabel 41: Opsætning for hyperparameter kalibrering. 9 gradient boosting hyperparametre er udvalgt for kalibrering. Parametre værdier der blev testede er angivet samt den optimale parameter værdi.

Gradient boosting parametre	**info**	**værdier**	**opti**
eta	Learning rate anvendt i boosting	array([0.05 , 0.075, 0.1 , 0.125, 0.15])	0.05
depth	Dybde/niveauer i træer	array([8, 9, 10, 11, 12, 13])	13
iterations	Max antal af træer	1000	1000
l2_leaf_reg	Koefficient i L2 regularisering	array([0, 2, 4, 6, 8, 10, 12])	4
subsample	Sample rate anvendt i bagging	array([0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.])	1
rsm	Fraktion af variabler brugt i opdeling	array([0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.])	0.6
min_data_in_leaf	Minimum træning data i blad	array([1, 5, 9, 13, 17, 21, 25])	25
random_strength	Tilføje tilfældighed i data opdeling	array([0.5 , 0.75, 1. , 1.25, 1.5])	0.5
bagging_temperature	Bayesian bootstrap parameter	array([0. , 0.5, 1. , 1.5])	1.5

Resultatet af 2250 tilfældige parametre sæts viser at MAE på validerings data (3-fold krydsvalidering) variere med mindre en 5 cm, Figur 46. Det er fordi parametre kombinationerne er forudvalgte med forventningen om at ligge tæt på den optimalt performance.

Det vuderes dermed at en udvided analyse af hyperparamtre er ikke nødvendigt fordi man kan antage at usikkerheden af selve pejlinger oversitger gevinsten i performance der kan opnås med en endu finere parametre tuning. Det er valgt en fælles paratmtre sæt til både sommer og vinter modellerne der lå blandt de besdte 1 % i begge modeller. Middle værdien af MAE for den 3 fold krydsvalidering bliver vist i Figur 46 i blåt for træningsdatasætet (75%) og i sort for testdatasættet (25%). Den overodnet performance er sammenligneint mellem træn- og testdata og det kan dermed

vuderes at den valgte paramatre sæt giver et robust resultat. De optimale parametre værdier er angivet i Tabel 41.



Figur 46: Performance af 2250 tilfældige kombinationer af hyperparamtre fra for både vinter og sommer model. Boksplottet angiver median (rød linje), 25 og 75 fraktiler (kassen), 2 og 98 fraktiler (whsikers) og ekstremværdier (røde punkter)

5.4. Performance

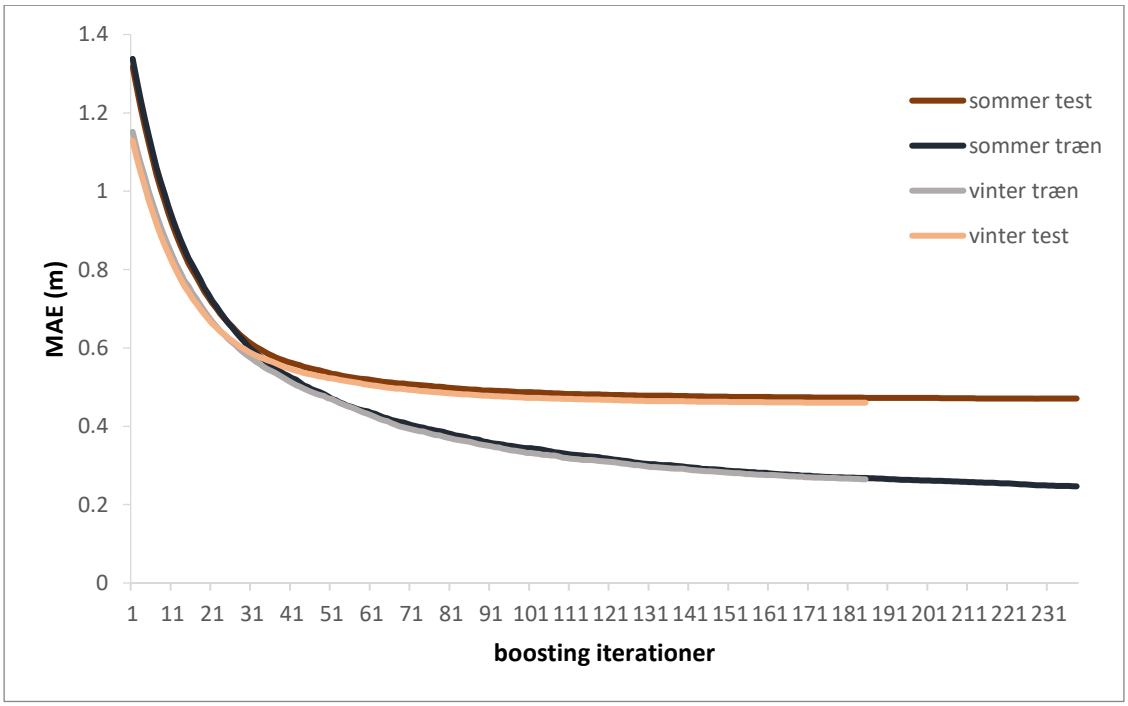
De endelige ML modeller blev trænet imod 75% af træningsdatasættet. De tilbageholdte 25% blev brugt som evaluering for at undgå overfitting. Den maksimale antal af boosting iterationer (antallet af beslutningstræer) er sat til 1.000, men træning kan stoppes inden det antal iterationer, hvis der opstår overfitting. Overfitting sker når performance på træningsdata forsætter med at forbedres med stigende boosting iterationer, mens performance på testdata bliver ringere eller stagnere. I hver boosting iteration bliver der tilføjet et ekstra beslutningstræ, der er trænet imod residualerene af de forrige træer. Initialisering og træning af en CatBoost model i python er vist i Figur 47.

```
cb_reg=CatBoostRegressor(eval_metric='MAE',
                         loss_function='MAE',
                         thread_count=50,
                         depth=13,
                         verbose=True,
                         iterations=1000,
                         learning_rate=0.05,
                         subsample=1,
                         rsm=0.6,
                         min_data_in_leaf=25,
                         random_strength=0.5,
                         l2_leaf_reg=4,
                         bagging_temperature=1.5
                        )

cb_reg.fit(train_data,eval_set=test_data,early_stopping_rounds=10)
```

Figur 47: Eksempel og initialisering og træning af en CatBoost gradient boosting model.

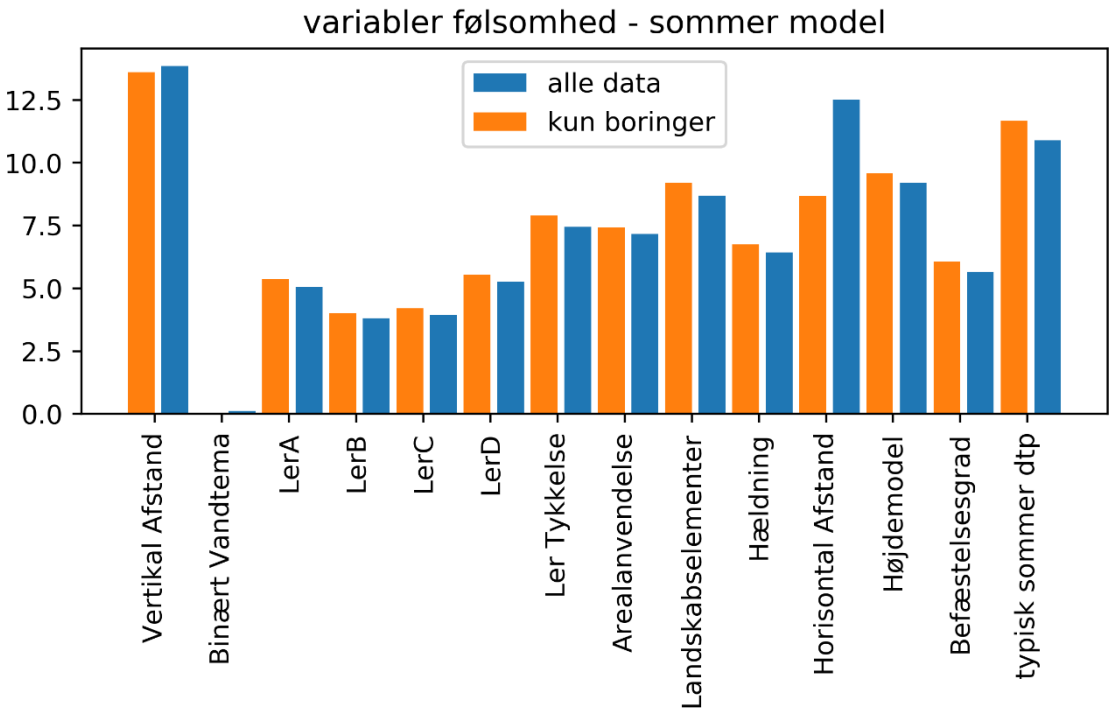
Figur 48 viser en graf af udvikling af performance (MAE) på trænings- og testdata afhængig af boosting iterationer for sommer- og vintermodellerne. Grafen angiver at det maksimale antal af iterationer, 1000, ikke blev opnået for begge modeller. Det ses nemlig at MAE på træningsdata forsætter med at forbedres med tilføjelse af flere boosting iterationer/beslutningstræer, imens MAE på testdata bliver konstant. Dermed stoppes CatBoost model træningsprocessen.



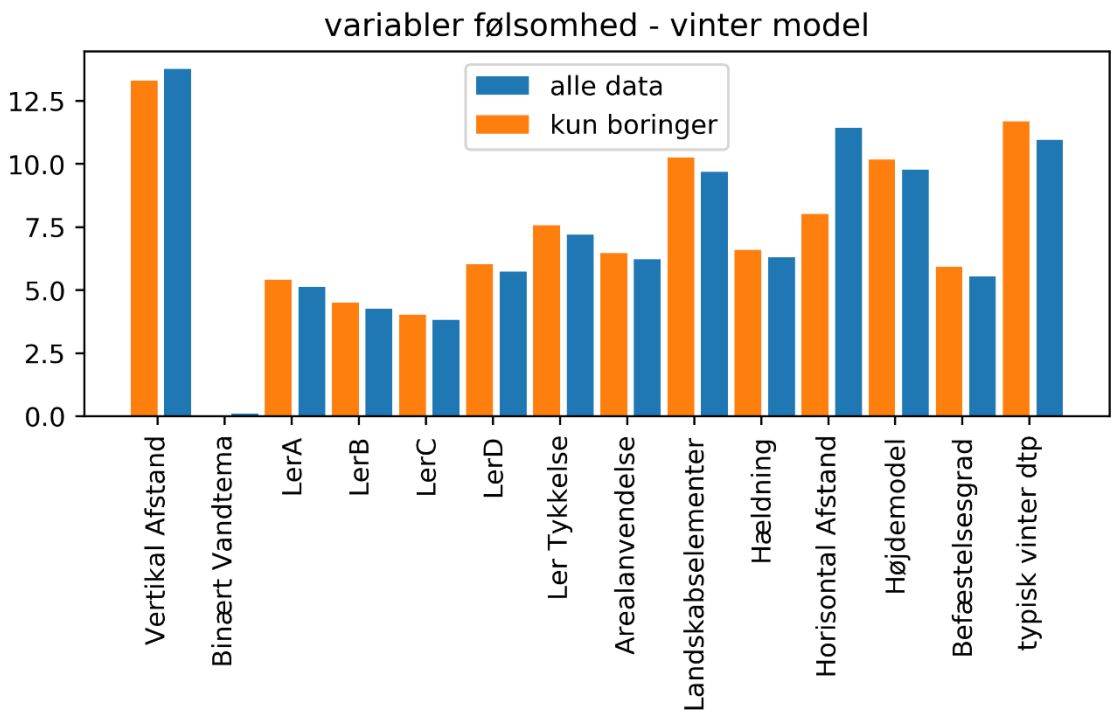
Figur 48: Oversigt over MAE for vinter og ommer model delt og i træn og test data for hvert boosting iteration. Trænings data udgør 75% og test data udgør 25%.

Figur 49 og Figur 50 præsenterer resultater af følsomhedsanalysen for både vinter- og sommermodellerne for de 14 forklarende variabler i to grafer. Det kan tolkes som en tab i performance (%) hvis en enkelt forklarende variabel bliver fjernet af modellen. Følsomheden er beregnet separat for alle

træningsdata (inkl. søer og støttepunkter) og separat kun for boringer. Det ses af graferne at forskellene mellem sommer- og vintermodellerne, især den relative følsomhed, er ubetydelig. For begge modeller er den vertikale afstand til den nærmeste overfladevands-grid den mest følsomme forklarende variable. Hvis man vurderer følsomheden alene i forhold til boringerne (pejlinger), optræder den modelsimulerede typiske sommer/vinter grundvandsdybde (dtp) på anden pladsen blandt samtlige forklarende variable ifølge den relative følsomhed. Hvis man tager alle data i betragtning, så indtager den horisontale afstand anden plads mht. forklaringsgrad. De mange søer og ekstra støttepunkter er velbeskrevne med den horisontale afstand og dermed får denne variabel en relativ stor betydning i ML modellen.



Figur 49 Følsomhed af de 14 forklarende variabler for sommermodellen beregnet separat for alle træningsdata og kun for boringerne. Følsomheden kan forstås som performance tab (%) under antagelsen at variablen er ekskluderet af modellen.



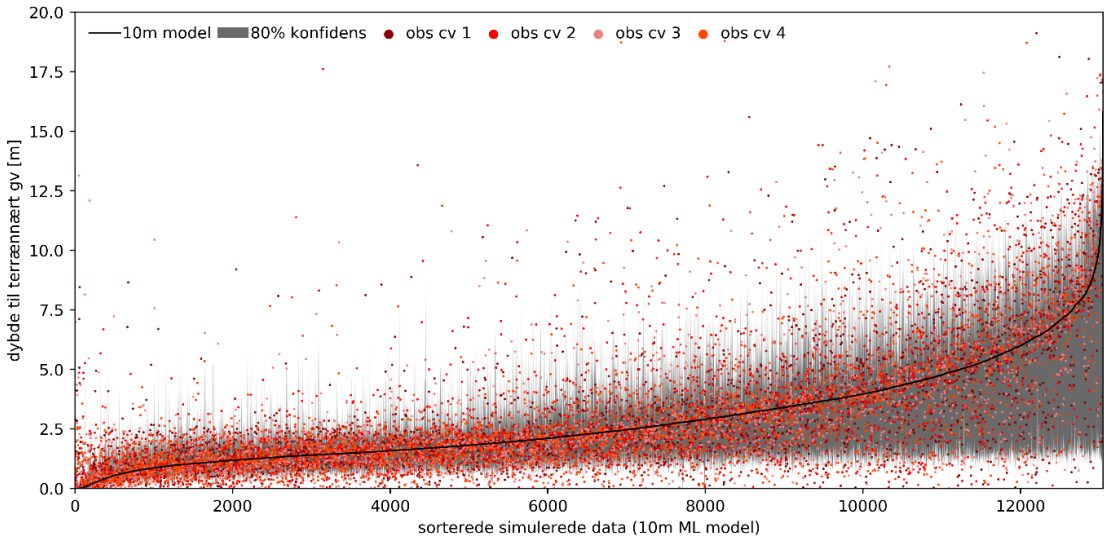
Figur 50 Følsomhed af de 14 forklarende variabler for vinter modellen beregnet separat for alle træningsdata og kun for boringerne. Følsomheden kan forstås som performance tab (%) under antagelsen at variablen er ekskluderet af modellen.

Følgende præsenteres resultater for en 4-foldkrydsvalidering for at analysere modellens performance og usikkerhedsanalysen mere detaljeret. Med dette formål er træningsdatasættet delt op i 4 lige store dele og fire modeller er trænet, hvor hver model bruger 3 dele (75%) til træning og en del (25%) som testdata. Performance er angivet i tabellerne. Figur 51 og Figur 52 viser den simulerede grundvandsdybde for alle krydsvalideringstests samt deres konfidensintervaller (q10 og q90). Vintermodellen har en MAE på 47cm på dyden til grundvandsstanden for alle træningsdata og en MAE på 116 cm hvis man kun tager boringer i betragtning (Tabel 42). Søerne, som alle har en grundvandsdybde lig med 0 m i træningsdatasættet, har en nøjagtighed på 3 cm og de 2000 støttepunkter som er placeret langs vandløb og kystlinjen har en MAE på 10 cm. Modellens robusthed kan afledes af den lille variation, der findes på tværs af de 4 krydsvalideringer.

Tabel 42: Resultater for en 4-fold krydsvalideringstest for vinter modellen. Performance er angivet for test data for hvert af de fire modeller (cv1, cv2, cv3 og cv4) samt en middelværdi på tværs af de 4 valideringstests. Performance er angivet som middel absolut fejl (MAE), root-mean-squared-error (RMSE) og forklaringsgrad (R2) for alle datatyper og tre forskellige udvælgelser.

vinter model		cv1	cv2	cv3	cv4	middel
Alle Data	MAE	0.47	0.47	0.47	0.45	0.47
	RMSE	1.23	1.21	1.21	1.18	1.20
	R2	0.72	0.72	0.71	0.73	0.72
Kun Borin-ger	MAE	1.16	1.17	1.18	1.13	1.16
	RMSE	1.94	1.92	1.93	1.89	1.92
	R2	0.51	0.52	0.51	0.53	0.51
Kun Søer	MAE	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	RMSE	0.26	0.25	0.28	0.23	0.25
	R2					
Kun støtte-punkter	MAE	0.09	0.08	0.11	0.10	0.10
	RMSE	0.27	0.22	0.28	0.27	0.26
	R2					

Figur 51 viser en graf med resultater af 4-foldvalideringstesten kun for boringer. Modellen følger observationerne godt, men der kan konstateres en tydelig stigning af usikkerheden for den dybereliggende grundvandsstand. Ifølge definition af quantile objektiv funktionerne, beskriver konfidensintervallet 80% af variationen. På grafen ses at op til en dybe på cirka 2 m er usikkerheden cirka 1 m, men usikkerheden stiger betydeligt til en værdi af cirka 7 m for grundvandsdybder tæt på 10 m.



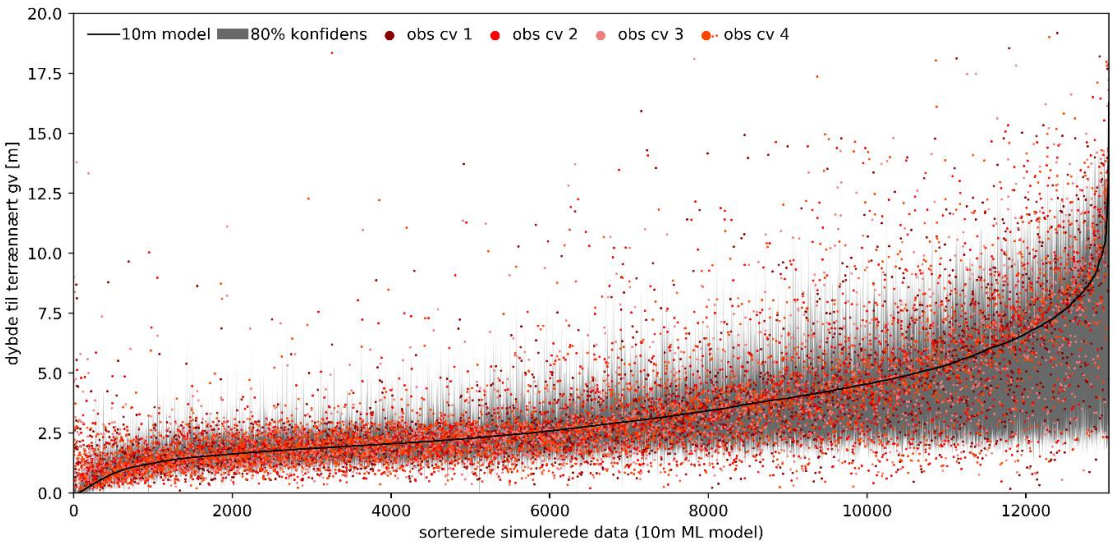
Figur 51: Resultatet af 4-fold validerings tests af vinter modellen samt angivelser af usikkerhedsbåndene som svar til en 80% konfidensinterval (q10 og q90). De observerede grundvandsdybder er vist i røde for de fire test datasæts. Kun boringer er vist i figuren (n=12987).

Tabel 43 viser valideringsstatistikken for sommermodellen og konklusionerne er analog med vintermodellen (Tabel 42). MAE ligger på 47 cm for alle træningsdata, på 117 cm kun for boringerne og søer og støttepunkter er simuleret med en høj nøjagtighed.

Tabel 43: Resultater for en 4-fold krydsvalideringstest for sommermodellen. Performance er angivet for test data for hvert af de fire modeller (cv1, cv2, cv3 og cv4) samt en middel værdi på tværs af de 4 valideringstests. Performance er angivet som middel absolut fejl (MAE), root-mean-squared-error (RMSE) og forklaringsgrad (R2) for alle data typer og tre forskellige udvælgelser.

sommer model		cv1	cv2	cv3	cv4	middel
Alle Data	MAE	0,48	0,48	0,48	0,46	0,47
	RMSE	1,24	1,21	1,23	1,19	1,22
	R^2	0,75	0,76	0,75	0,77	0,76
Kun Boringer	MAE	1,17	1,18	1,19	1,15	1,17
	RMSE	1,96	1,92	1,95	1,91	1,93
	R^2	0,51	0,53	0,51	0,54	0,52
Kun Søer	MAE	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04
	RMSE	0,30	0,27	0,33	0,27	0,29
	R^2					
Kun støtte-punkter	MAE	0,13	0,11	0,13	0,12	0,12
	RMSE	0,31	0,31	0,35	0,32	0,32
	R^2					

Figur 52 viser resultaterne af valideringstesten for sommermodellen. I forhold til vintermodellen (Figur 51) har sommermodellen den sammen stigning af usikkerheden jo dybereliggende grundvandsstand bliver. Niveauet af dybden til det terrænnære grundvand i sommermodellen ligger, som forventet, lidt dybere end vintermodellen.



Figur 52: Resultatet af 4-fold validerings tests af sommer modellen samt angivelser af usikkerhedsbåndene som svar til en 80% konfidensinterval (q10 og q90). De observerede grundvandsdybder er vist i røde for de fire test datasæts. Kun boringer er vist i figuren (n=12987).

6. Dataleverancer og metadatabeskrivelser

Klimaændringerne medfører en stigende efterspørgsel efter data om det terrænnære hydrologiske forhold for både historisk tid, nutid og fremtid fra både det offentlige og private. Formålet med Hip4Plus er som tidligere beskrevet at levere modelberegninger af dybden til terrænnært grundvand, vandføring i vandløb samt vandindhold i rodzonen i høj rumlig og tidslig opløsning baseret på både observeret historisk klima og klimafremskrivninger for to emissionsscenarier. Disse leverancer kommer til at være offentligt tilgængelige på SDFE's portal, Dataforsyningen.

I kommende afsnit vises eksempler på dataleverancerne til HIP4plus, f.eks. simuleret dybde til grundvandsspejlet i 100m for den historiske periode. I afsnit 6.2 vises eksempel på klimafremskrivninger med 500m modellen med nettonedbør for fjernfremtid. Eksempler på nedskalering fra 500m til 100m vises med ændringerne i dybde til grundvandsspejlet se afsnit 6.3 og i afsnit 6.4 præsenteres eksempler på maskinlæring (ML) med sommer- og vinterdybden til grundvandet i 10m. Eksempler på randbetingelser til lokalmodeller vises i afsnit 6.5.

De resterende dataleverancer er leveret til SDFE som bliver udstillet på deres portal. I Tabel 44 gives et hurtigt overblik over alle dataleverancerne i HIP4Plus.

Tabel 44: Overblik over alle dataleverancer til SDFE.

Leverancer til SDFE	**Historiske 100m**	**Historisk 500m**	**Historisk 10m ML**	**Klimafremskrivninger 500m (Bornholm 100m)**	**Klimafremskrivninger nedskaleret til 100m**
(1) dybde til grundvandet (afstand til vandspejl m.o.t)	x (**)	x	x vinter & sommer	x (**, ****)	x (****)
(2) Vandindhold i umættet zone	x			x (****)	
(3) Grundvandsflow X,Y	x (*,**)			x (**)	
(4) Grundvandsflux, Z	x (***)				
(5) Tidsvarierende potentiale	x (*,**, ***)			x (**)	
(6) Infiltration til mættet zone - nettonedbør	x (**)			x (**)	
(7) Vandføring	x (**)	x		x (**, ****)	
(8) Hydrostratigrafisk model	x (*)	x (*)			
Usikkerheder	Punkt (1) og (7)		(1) (q50, q10, q90) (*****)	(1), (2) og (7) (******)	
Kalibrering og valideringsdata	x	x			

Usikkerhederne formidles primært som standardafvigelser og performance statistik, både rumlig og i tabel
** alle lag*
*** randbetingelse til lokalmodeller*
**** seks vandførende lag*
***** ændring i forhold til reference scenarie*
****** usikkerheden bestemt ud fra q50, q10 og q90 fraktil for vinter- og sommersituationen*
*******median og standardafvigelse på tværs af klimamodellen*

6.1. 100m model for historisk periode 1990 – 2019

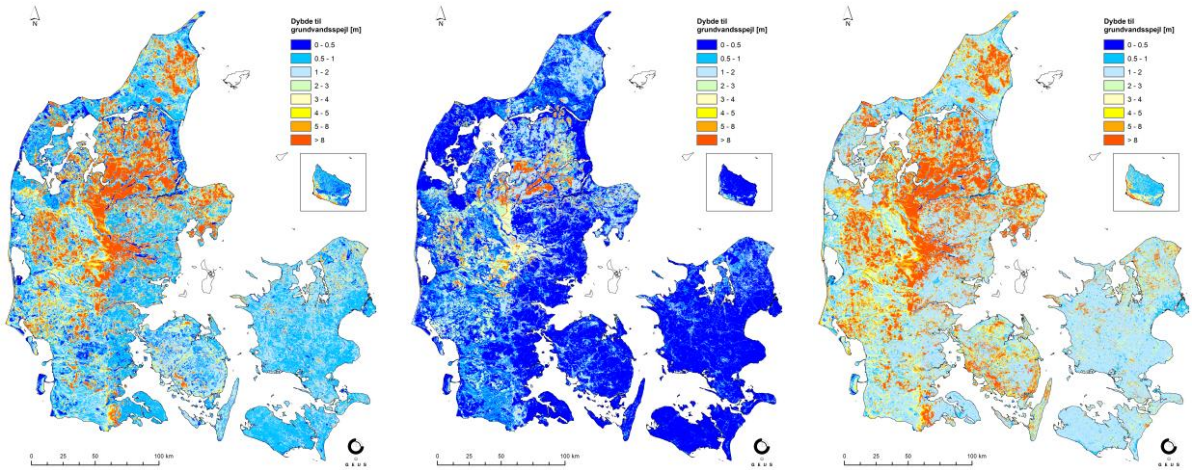
I det kommende afsnit beskrives eksempler på HIP4Plus leverancer for DK-model HIP 100m for den historiske periode 1990 - 2019. Til SDFE er der leveret følgende data leverancer: ***Dybde til det terrænnære grundvand***, ***Vandindhold i rodzonen*** og ***Vandføring.***

Dybde til terrænnært grundvand

For dybden til grundvandet består leverancen af tidsserier (dag, måned, sæson, år) og beskrivende statistik for:

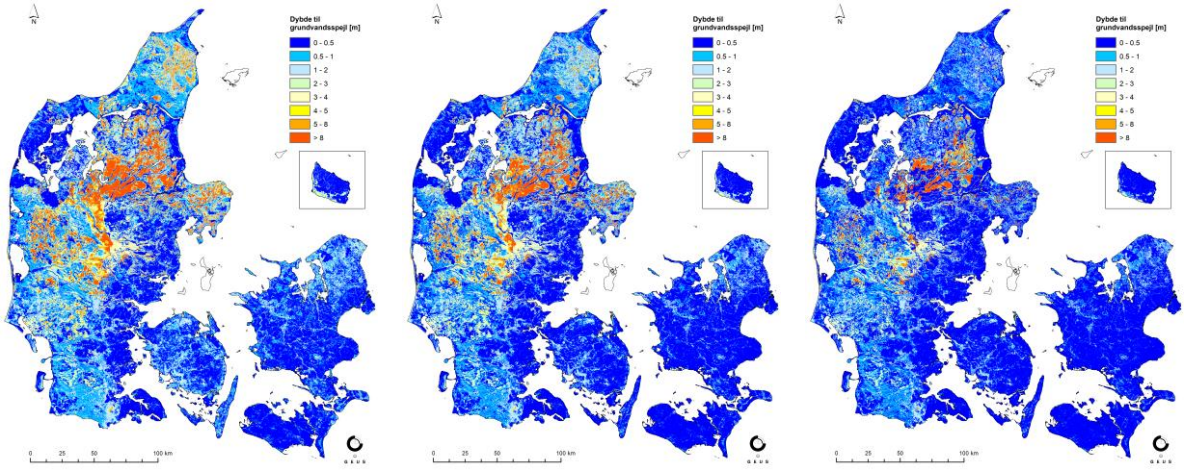
- Maksimum, minimum, middel, standard afvigelse (periode, sæson og måned)
- Overskridelses percentiler (1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 og 99) (periode, sæson og måned)
- T-hændelser (2-, 5-, 10-, 20-, 50- og 100-årshændelse) (kun hele perioden)
- Overskridelsessandsynligheden/frekvensen af terrænnært grundvand tættere end 1m/2m under terræn (kun hele perioden)

I Figur 53 ses den simulerede middel, mindste og største dybde til det terrænnære grundvand beregnet med DK-model HIP 100m i perioden 1990 - 2019.



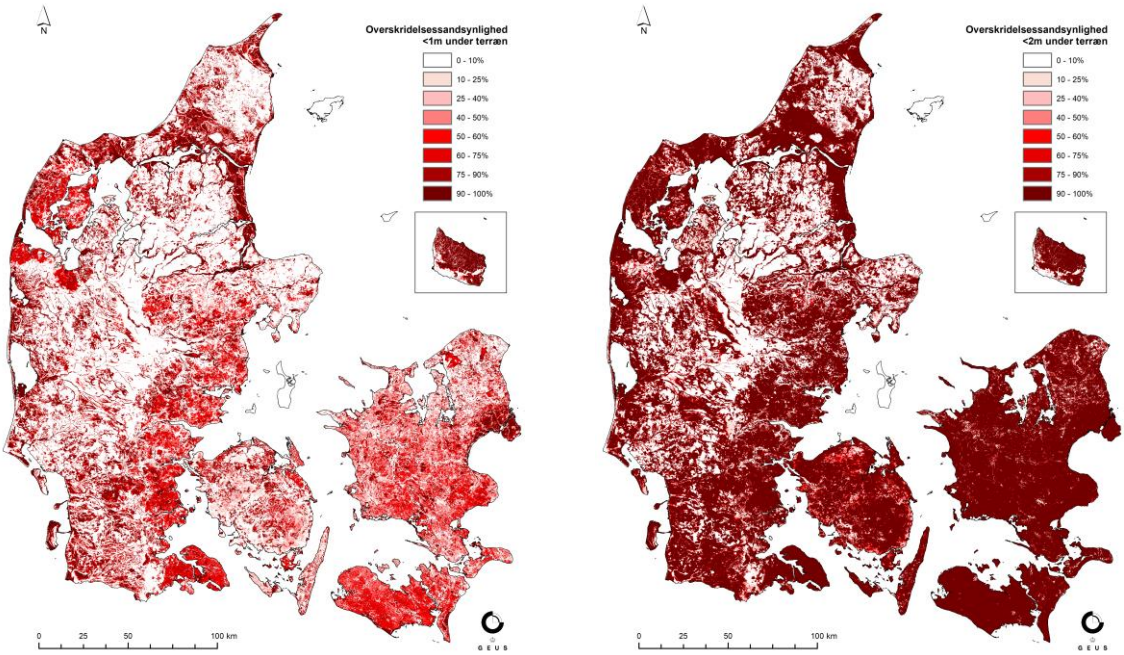
Figur 53: Dybden til terrænnært grundvand, middel dybde, mindste dybde samt største dybde for perioden 1990 – 2019.

I Figur 54 ses eksempler på de leverede simulerede T-hændelse for den simulerede dybden til grundvandsspejlet (T2, T10 og T100) for DK-model HIP 100m i perioden 1990 - 2019.



Figur 54: T-hændelse for dybden til grundvandsspejlet. T2, T10, T100.

Overskridelsessandsynlighed (frekvens) for hvorvidt dybden til grundvandsspejlet ligger mindre end hhv. 1m og 2m i perioden 1990 - 2019 simuleret med DK-model HIP 100m vises i Figur 55.



Figur 55: Sandsynligheden for at de terrænnære grundvand står højere end 1m under terræn i perioden 1990 – 2019.

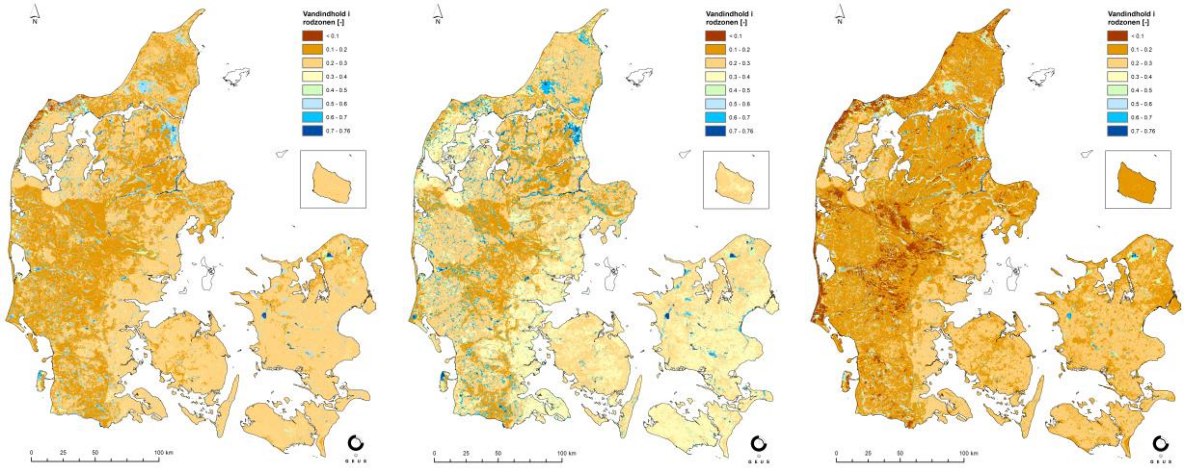
Vandindhold i rodzonen

Vandindholdet i rodzonen er den vandmængde der er i rodzonen [m^3/m^3]. Vandindholdet i rodzonen er enhedsløst, og måles mellem 0 og 1. I MIKE SHE er variationen i jordfugten styret af nedbør, fordampning og den årlige variation i rodzonens dybde.

For vandindholdet i den umættede zone består leverancen af tidsserier (dag, måned, sæson, år) og beskrivende statistik for:

- Middelværdi, standard afvigelse samt overskridelses percentilerne 99 (minimum) og 1 (maksimum) (for hele perioden, sæson og måned)

I Figur 56 vises den simulerede middel værdier af vandindhold i rodzonen for perioden 1990 - 2019 simulereret i DK-model HIP 100m samt middel vandindhold i rodzonen for vinter og sommer i perioden 1990 – 2019. Sommerperioden defineres som juni, juli og august og vinterperioden defineres som december, januar og februar.



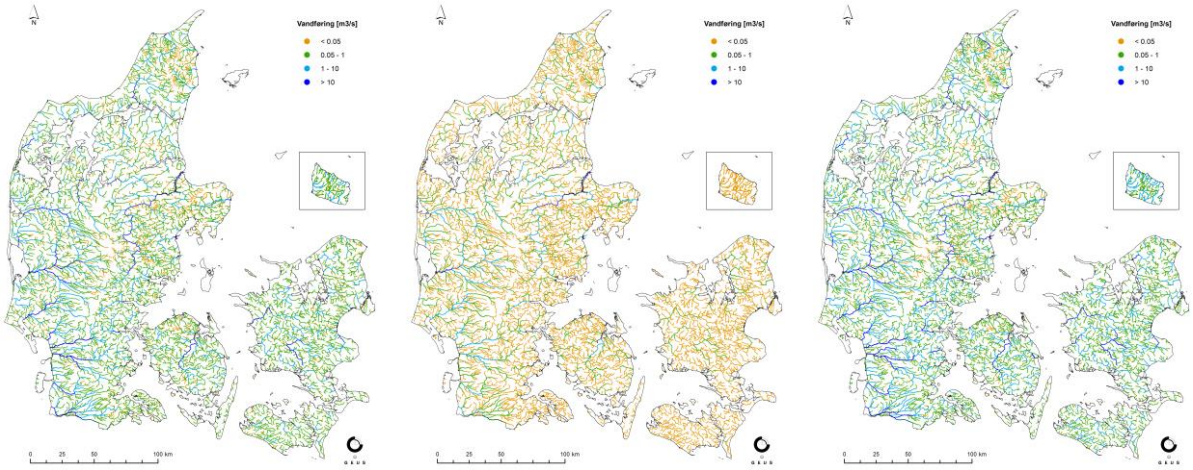
Figur 56: Vandindhold i rodzonen som middel, vinter og sommer i perioden 1990 – 2019.

Vandføring

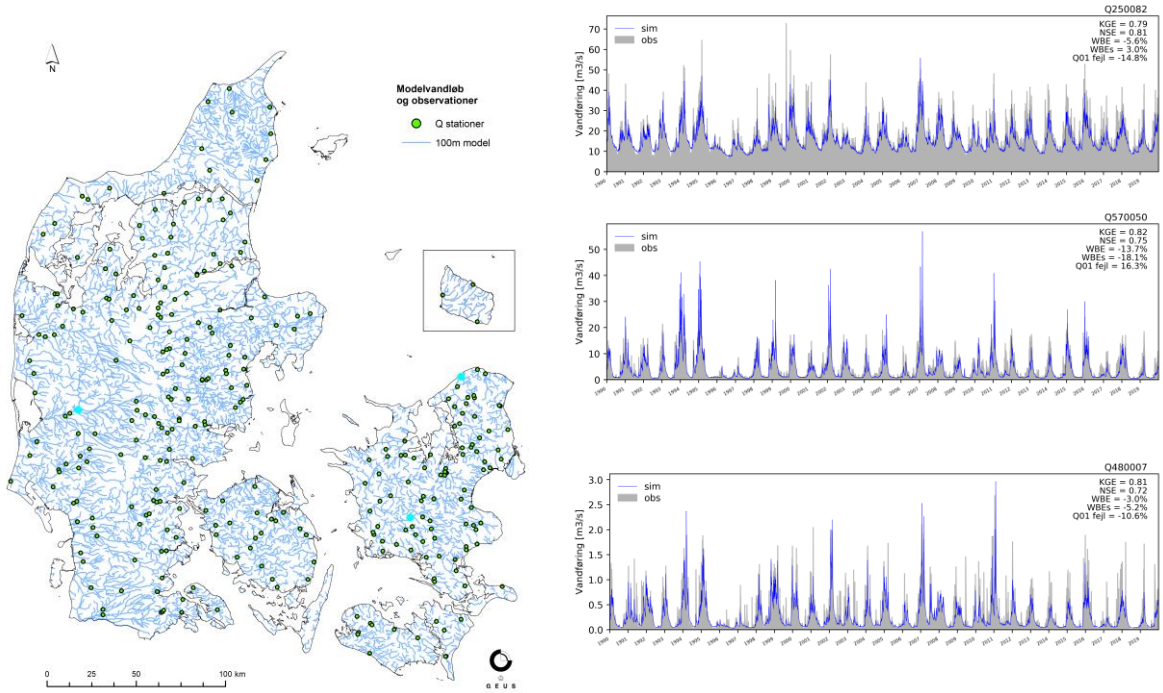
For vandføring består leverancen af tidsserier (dag, måned, sæson, år) og beskrivende statistik for hele perioden, sæson- og månedsniveau, for alle vandføringspunkter i modellen, mere end 62.000 punkter.

- Maksimum, minimum, middel, standard afvigelse (periode, sæson og måned)
- Overskridelses percentiler (1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 og 99) (periode, sæson og måned)
- T-hændelser (2-, 5-, 10-, 20-, 50- og 100-årshændelse) (kun for perioden)
- Median maksimum og median minimum (kun for perioden)

Eksempel på leverancer af vandføring vises med overskridelses percentilerne Q01, Q95 og T10 simuleret i DK-model HIP 100m i Figur 57. Tidsserier for udvalgte stationer sammen med observeret vandføring vises i Figur 58.



Figur 57: Vandføring Q01 tv, Q95 i midten og T10 th.



Figur 58: Simuleret og observeret vandføring i udvalgte stationer (lyseblå) Q250082, Skjern Å, Q570050, Øvre Suså, Q480007, Højbro Å Nordsjælland.

6.2. Klimafremskrivninger for RCP4.5 og RCP8.5

Modelsimuleringer af klimafremskrivninger simuleres i 500m for hele landet undtaget for Bornholm som simuleres i 100m. For de to RCP-scenarier er der udregnet median og standard afvigelse på tværs af de forskellige statistikker, der er udregnet for klimasimuleringerne, Tabel 19. Den enkelte statistiske størrelser er navngivet med RCP scenarie og et postfix, som angiver opsummerende statistik- og

resultat art, Tabel 31, samt evt. angivelse af typen af statistik, Tabel 25 til Tabel 28, opsummeringen er lavet på.

I det kommende afsnit beskrives eksempler på HIP4Plus leverancer, som er afleveret til SDFE, for klimafremskrivningerne for både RCP4.5 og RCP8.5 scenarierne. Til SDFE er der leveret følgende data leverancer for klimafremskrivningerne: ***Dybde til det terrænnære grundvand***, ***Vandindhold i rodzonen*** og ***Vandføring.***

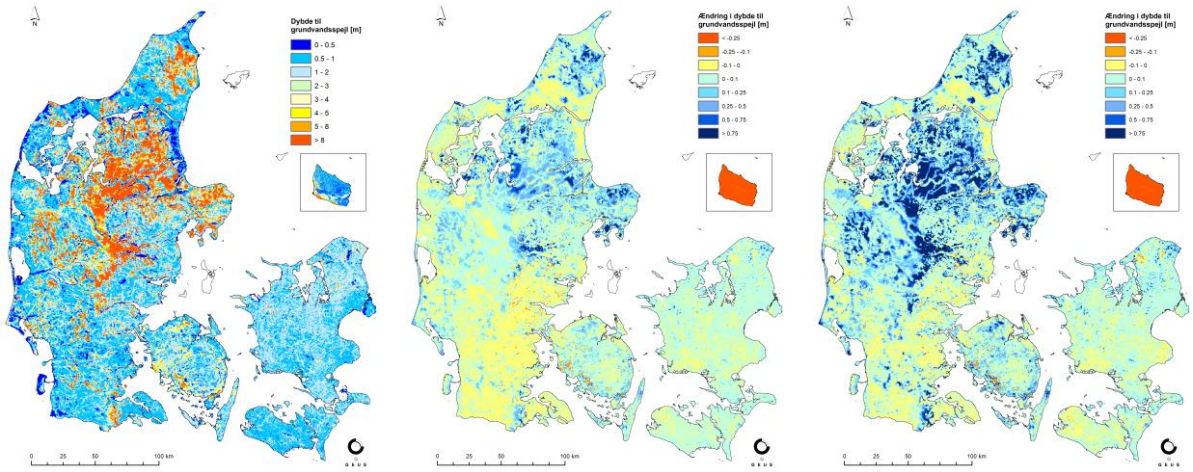
Dybde til terrænnært grundvand

Der er udregnet median og standard afvigelse for de to CO2 scenarier af forskel mellem de enkelte klimascenariers (17 RCP8.5 klimascenarier hhv. 5 RCP4.5 klimascenarier) beskrivende statistik for reference (1991-2020) og beskrivende statistik for fremtid (hhv. 2041-2070 og 2071-2100) af simulering af dybde til grundvandsspejlet.

For dybden til grundvandet består den beskrivende statistik af:

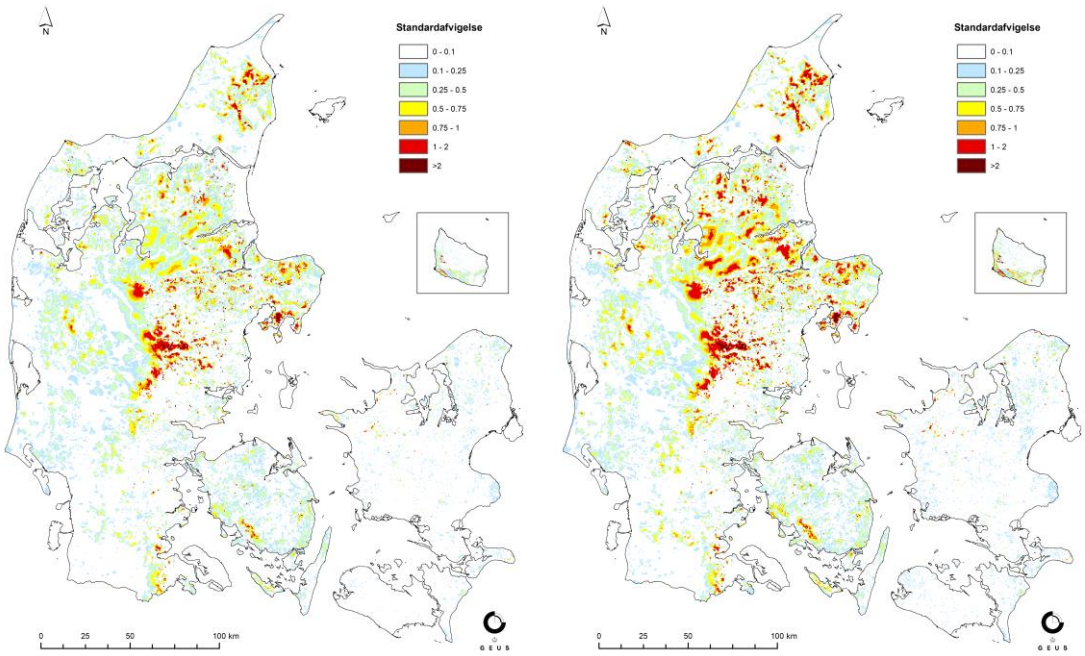
- Middelværdi, Q01 (grundvandsspejl tæt på terræn bruges som maksimumværdi) og Q99 (grundvandsspejl langt fra terræn bruges som minimumsværdi) (for hele perioden, sæson og måned)
- T-hændelser (2-, 5-, 10-, 20-, 50- og 100-årshændelse) (kun hele perioden)
- Overskridelsessandsynligheden/Frekvensen af terrænnært grundvand tættere end 1m/2m under terræn (kun hele perioden)

I Figur 59 vises eksempler på dataleverancer af den simuleret dybde til det terrænnære grundvand for den historiske 500m model samt den beregnede ændring i dybden til det terrænnære grundvand for nær- og fjernfremtid (hhv. 2041-2070 og 2071-2100) ift. referenceperioden (1991-2020) for medianen af 17 RCP8.5 klimascenarier.



Figur 59: Middel dybde (1990 – 2019) til grundvandsspejlet med 500m historisk mode, Bornholm i 100m, (til venstre) samt ændringen i dybden for klimascenarie RCP8.5 nær (i midten) og fjern fremtid (til højre). Bemærk. Granskning har påvist en fejl i processering af klimafremskrivning for Bornholm, genberegning er igangsat og forventes implementeret i løbet af marts 2021.

Standardafvigelsen for dybden til grundvandsspejlet for hhv. alle RCP8.5 scenerierne og RCP4.5 scenarierne i både nær- og fjernfremtid blev leveret til SDFE. I Figur 60 fremgår standardafvigelsen for dybden til grundvandsspejlet for RCP8.5 nær fremtid og RCP8.5 fjern fremtid.



Figur 60: Standardafvigelsen for dybden til grundvandsspejlet for RCP8.5 nær fremtid (tv) og RCP8.5 fjern fremtid (th). Bemærk. Granskning har påvist en fejl i processering af klimafremskrivning for Bornholm, genberegning er igangsat og forventes implementeret i løbet af marts 2021.

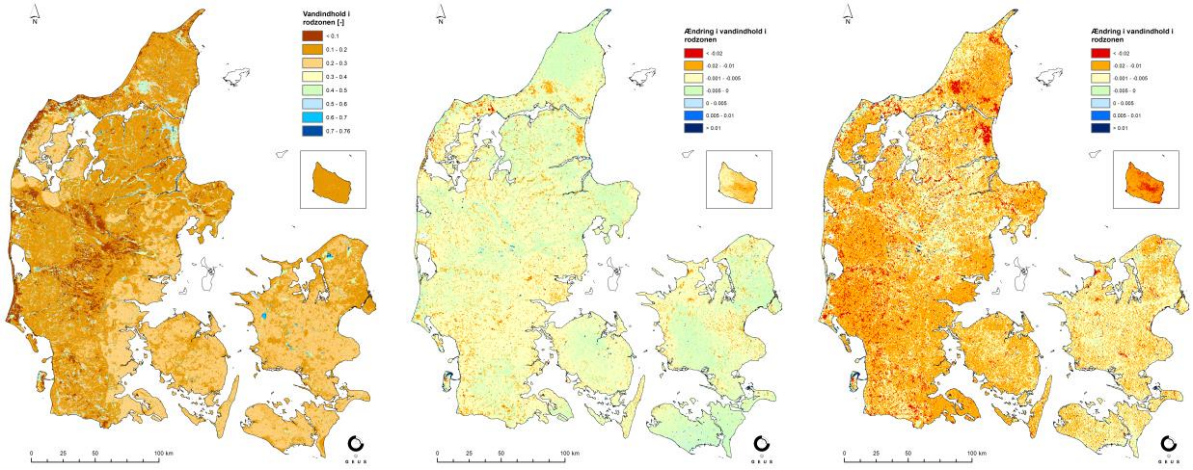
Vandindhold i rodzonen

Der er udregnet median og standard afvigelse for de to CO2 scenarier af forskel mellem de enkelte klimascenariers (17 RCP8.5 klimascenarier hhv. 5 RCP4.5 klimascenarier) beskrivende statistik for reference (1991-2020) og beskrivende statistik for fremtid (hhv. 2041-2070 og 2071-2100) for vandindhold i rodzonen.

Den beskrivende statistik består af:

- Middelværdi, Q01 (tættest på terræn bruges som maksimumsvandindhold) og Q99 (længst fra terræn bruges som minimumsvandindhold) (for hele perioden, sæson og måned)

Eksempel på leverancer af vandføring vises på Figur 61. Figuren viser DK-model HIP 100m middel af sommermånedernes vandindhold i rodzonen samt DK-model HIP 500m ændring i median af sommermånedernes vandindhold i rodzonen i RCP4.5 og RCP8.5 i fjern fremtid.



Figur 61: Historisk 100m sommer middel, ændring i vandindholdet i rodzonen RCP4.5 sommer median fjern fremtid og RCP8.5 sommer median fjern fremtid. Bemærk. Granskning har påvist en fejl i processering af klimafremskrivning for Bornholm, genberegning er igangsat og forventes implementeret i løbet af marts 2021.

Vandføring

Der er udregnet median og standard afvigelse for de to CO2 scenarier af forholdet (klimafaktor[1]) mellem de enkelte klimascenariers (17 RCP8.5 klimascenarier hhv. 5 RCP4.5 klimascenarier) beskrivende statistik for fremtid (hhv. 2041-2070 og 2071-2100) og beskrivende statistik for reference (1991-2020) af simulering af vandløbsafstrømning.

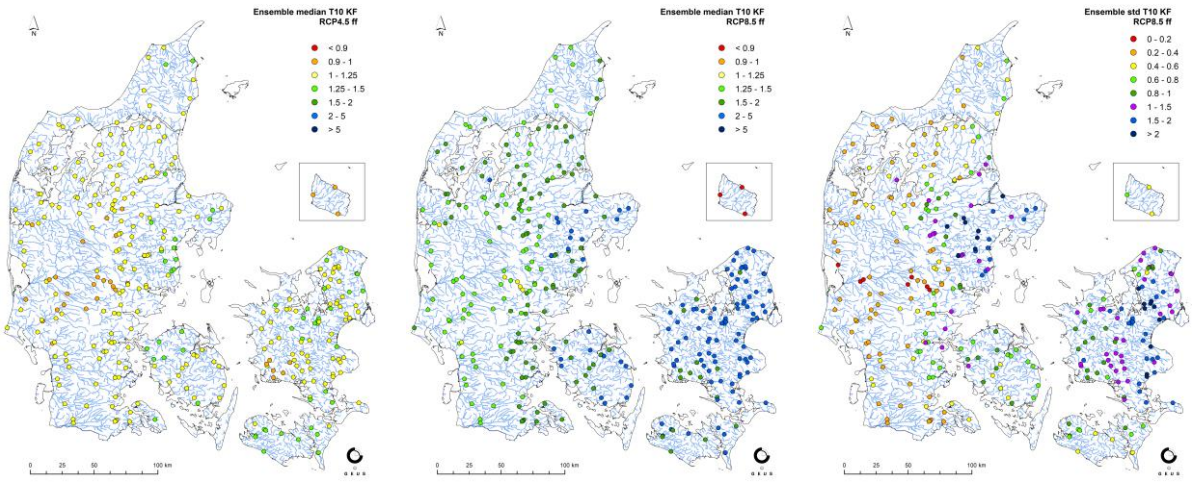
Den beskrivende statistik består, for hele perioden, måneds- og sæson niveau, af:

- Middel- Minimums- og maksimumsværdi for vandføringen (periode, sæson og måned)
- Percentiler for vandføringen (1, 5, 10 25, 50, 75, 90 95, 99) (periode, sæson og måned)
- T-hændelser (2-, 5-, 10-, 20-, 50- og 100-årshændelse) (kun for perioden)
- Median maksimum og median minimum (kun for perioden)

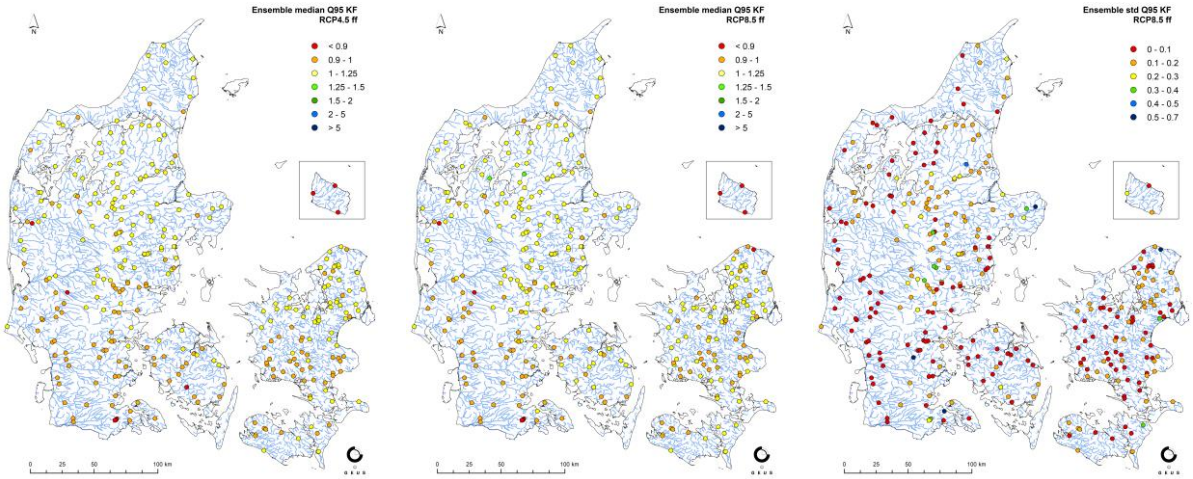
For hvert af de ca. 48.000 beregningspunkter (ca. 44.000 i DK-model HIP 500m plus ca. 5.000 for Bornholm i 100m) er der gemt daglige værdier af afstrømning (m^3/s).

I Figur 62 vises eksempler på den beregnede klimafaktor på 10-års maksimalvandføring i vandføring for fjernfremtid ift. referenceperioden for hhv. medianen af alle 5 RCP4.5 klimascenarier og 17 RCP8.5 klimascenarier samt standardafvigelsen for RCP8.5 fjernfremtid. I Figur 63 vises Q95 for RCP4.5 og RCP8.5 samt standardafvigelsen for fjern fremtid. Figurerne viser kun data fra vandførings-stationerne.

[1] *klimafaktor=fremtid scenarie/reference scenarie*



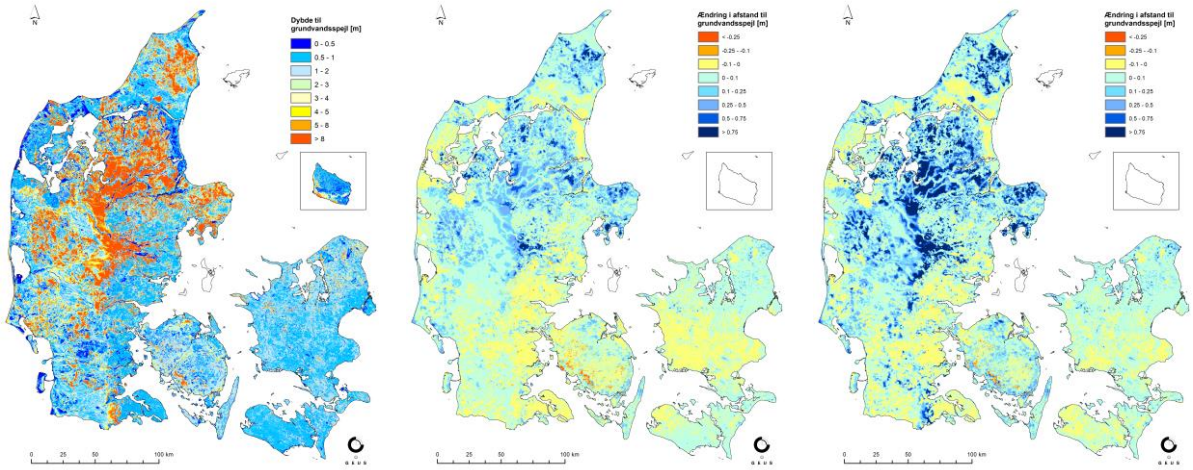
Figur 62: Klimafremskrivning, median på klimafaktor på 10-års maksimal vandføring fjern fremtid, RCP4.5 til venstre og RCP8.5 i midten, standardafvigelsen til RCP8.5 fjern fremtid til højre. Viser kun vandføringsstationer. Bemærk. Granskning har påvist en fejl i processering af klimafremskrivning for Bornholm, genberegning er igangsat og forventes implementeret i løbet af marts 2021.



Figur 63: Klimafremskrivning, median på klimafaktor Q95, RCP4.5 til venstre og RCP8.5 til højre. Standardafvigelsen for RCP8.5 fjern fremtid vises th. Viser kun vandføringsstationer. Bemærk. Granskning har påvist en fejl i processering af klimafremskrivning for Bornholm, genberegning er igangsat og forventes implementeret i løbet af marts 2021.

6.3. Nedskalering af klimafremskrivninger til 100m

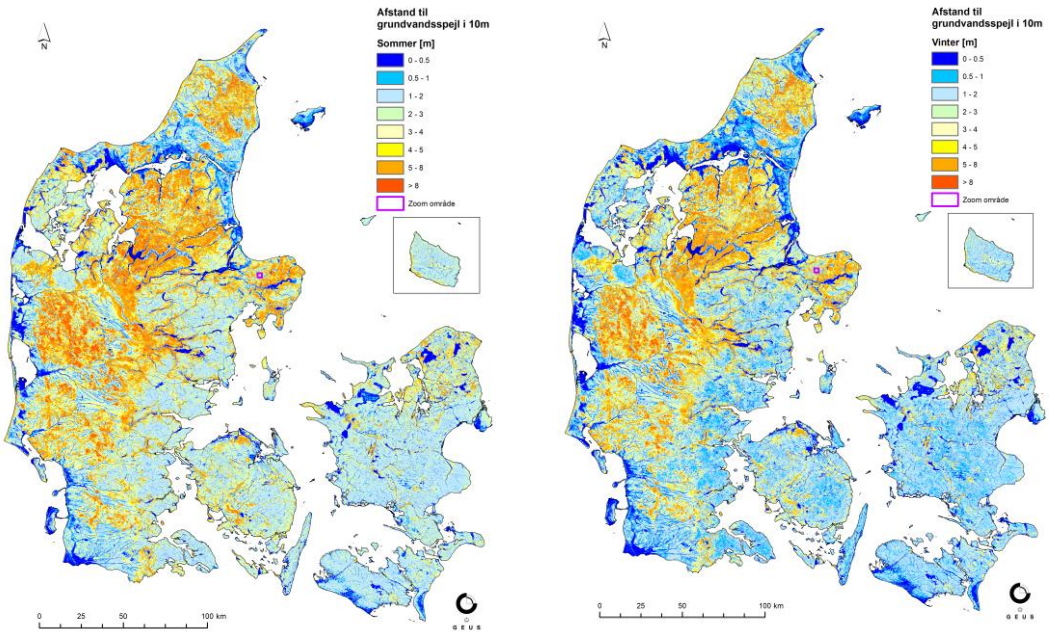
For klimafremskrivninger blev en række statistiske størrelser leveret baseret på den landsdækkende hydrologiske model i 500m opløsning (se afsnit 6.2). Ud af disse leverancer, blev ændringen i dybden til terrænnært grundvand også leveret i 100m opløsning. Disse data blev produceret baseret på en machine learning nedskaleringsalgoritme som beskrevet i afsnit 4. Figur 64 viser den nedskalerede ændring i dybden til det terrænnære grundvand (100m) for fjernfremtid (2071-2100) ift. referenceperioden (1991-2020) for hhv. medianen af alle 5 RCP4.5 klimascenarier og 17 RCP8.5 klimascenarier, samt den simulerede historiske dybde til grundvandsspejlet med 100m modellen. Nogen detaljerede udsnit og en sammenligning af 100m nedskalering med 500m model resultater findes i afsnit 4.3.



Figur 64: Simuleret middeldybde til grundvandsspejlet med 100m historisk kørsel, samt nedskaleret ændring i dybden til grundvandsspejlet, RCP4.5 fjern fremtid i midten og RCP85 fjern fremtid til højre.

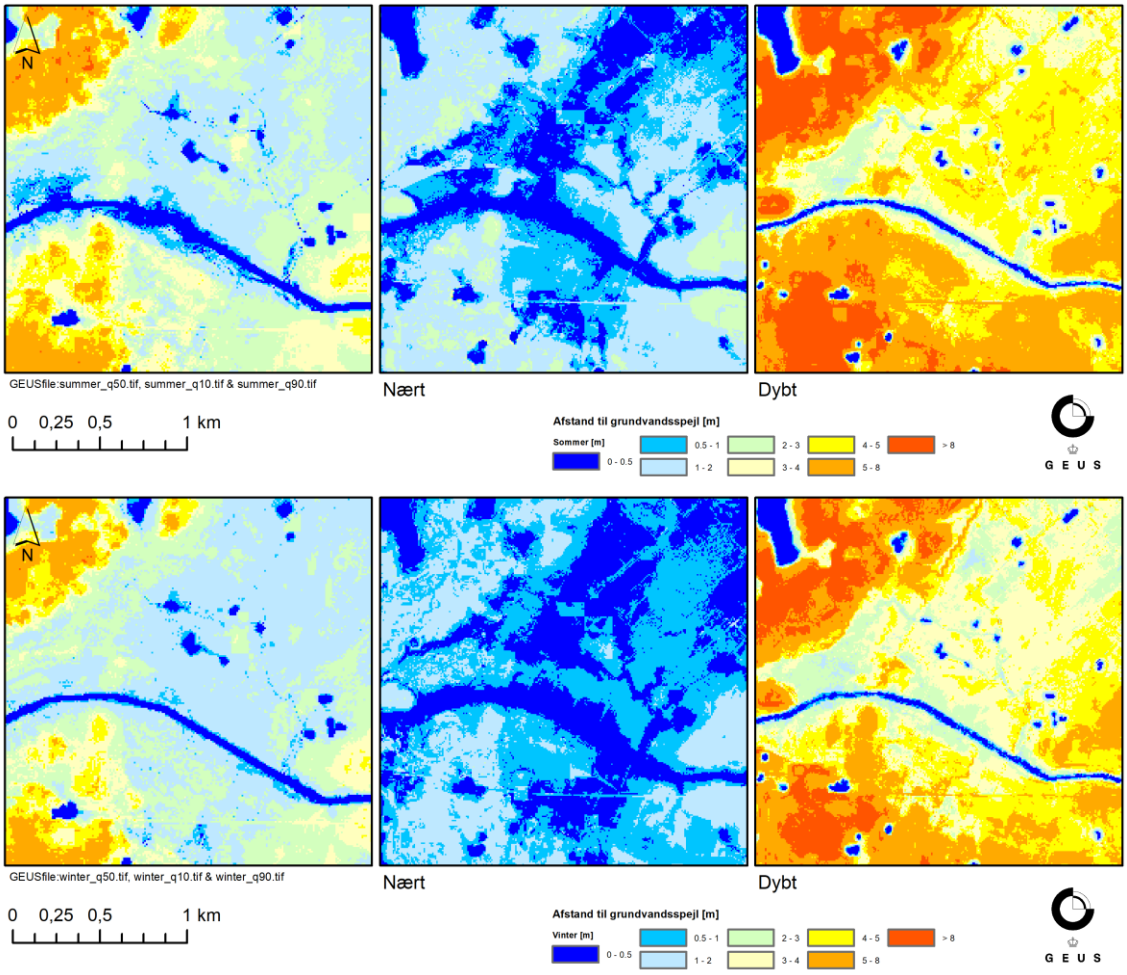
6.4. ML 10m model af dybde til terrænnært grundvand

Her præsenteres landsdækkende resultater af 10 m ML modeller for en typisk sommer-og vinter-tilstand, Figur 65.



Figur 65: Resultatet af 10m ML modellen for typisk sommer tilstand (venstre) og typisk vinter tilstand (højre).

Figur 66 viser 10 m ML modellen for et given zoom område, som er angivet i Figur 65. 80% konfidensintervallet (q10 og q90) er beskrevet af nært bånd og en dybt bånd.



Figur 66: Resultatet af konfidens intervaller af 10m ML modellen for typisk sommer tilstand (top) og typisk vinter tilstand (bund). Zoom området er angivet i Figur 65. Kortene på venstre siden viser typisk sommer/vinter tilstand og kortene i midten og højre side viser hhv. nære (q10) og dybe (q90) konfidensintervaller.

6.5. Randbetingelser til lokalmodeller

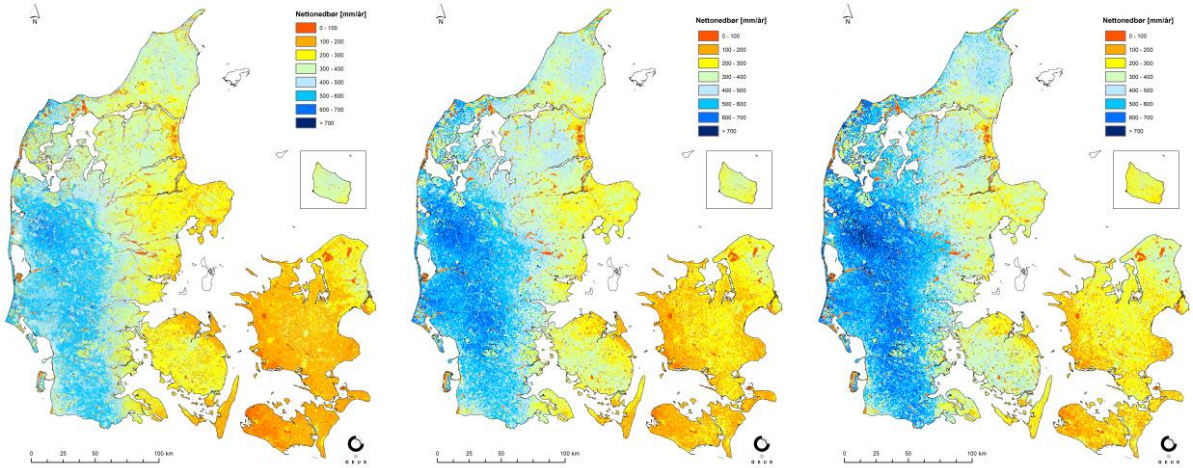
For alle historiske og klimascenarie modelkørsler er der dannet NetCDF af trykniveau for alle lag med 15 dages opløsning og nettonedbør, dybde til grundvandsspejlet og afstrømning i vandløb (inkl. placering) med 1 dags opløsning. Herudover er der dannet NetCDF data med modellag og for vandløbsplacering.

Der er udtrukket tidsvarierende data for de historiske simuleringer og for tre perioder for hver af klimasimuleringerne (reference, nær fremtid og fjern fremtid), så det er muligt at opstille en lokalmodel og afvikle såvel historiske som klimasimuleringer med randbetingelser fra DK-model HIP. Det skal bemærkes at DK-model HIP er afviklet i 100m grid for den historiske periode og randbetingelserne ligger tilgængelige i 100 m, men ikke for klimasimuleringerne da disse er afviklet i 500 m grid, hvorfor randbetingelserne for disse kun er tilgængelige i 500m grid.

For alle randbetingelsesdata er der dannet TIF filer med middelværdier for de enkelte 30 års perioder (historisk, reference, nær fremtid og fjern fremtid). TIF filerne er angivet i bearbejde enheder (fx mm/år for nettonedbør) og data fra de enkelte vandførende modellag er oversat til grundvandførende lag 1-6 (gwl1-gwl6).

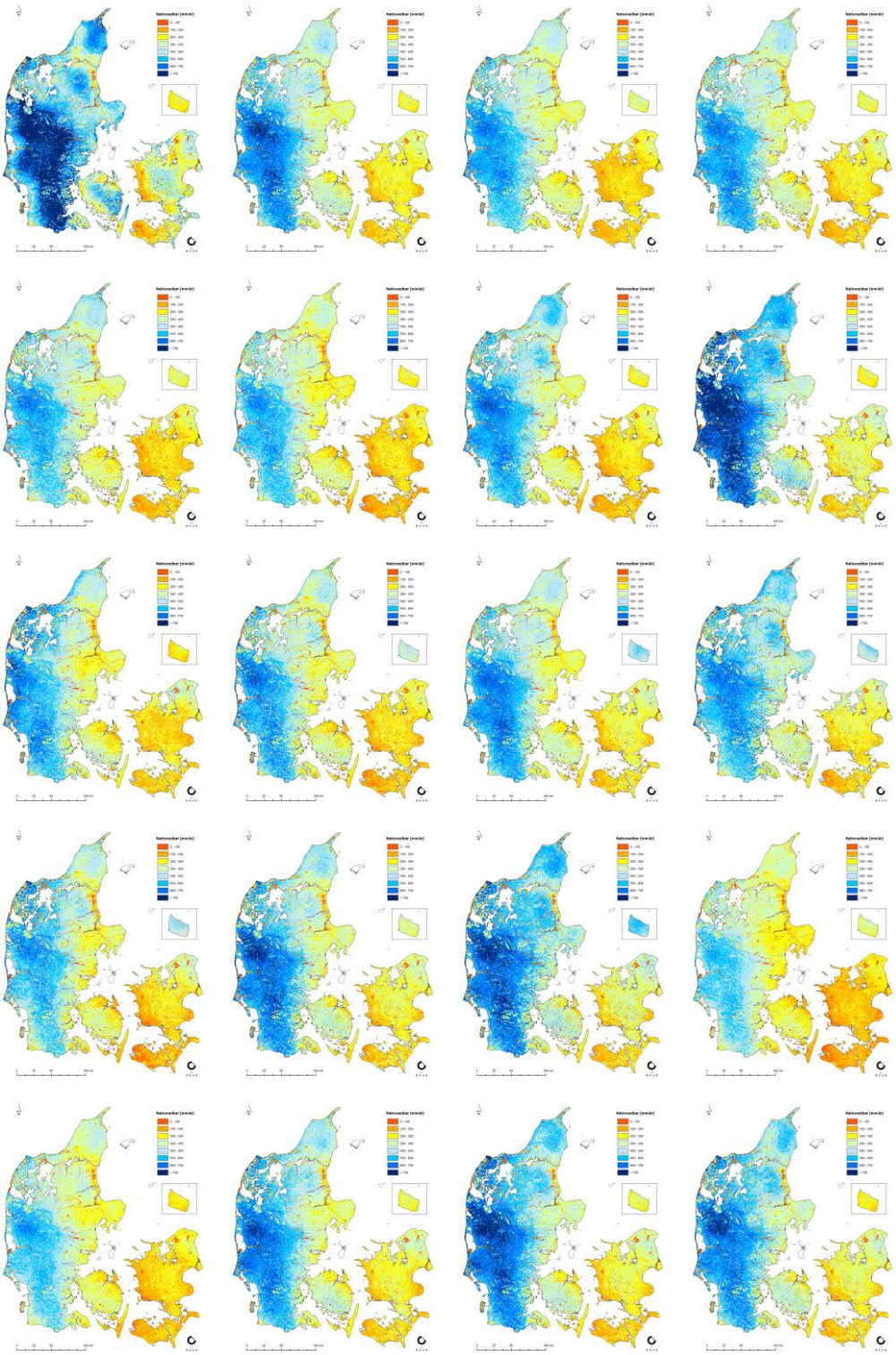
TIF filerne med middelværdier forventes at blive brugt i orienterende arbejde og som input stationært input til lokalmodeller, hvor det primært er de vandførende enheder der vil være brug for at låse fast med en tryk eller flux rand (ikke vandførende enheder vil typisk låses fast med no-flow rande). For den historiske periode er der desuden dannet middelværdier for den horisontale grundvandsflux for alle den vandførende lag. Disse data er ikke udtrukket med det formål at skulle bruges direkte som modelrand til en lokal model, men de er i stedet tænkt anvendt i det orienterende arbejde, fx til lokalmodel afgrænsning og placering af randbetingelser.

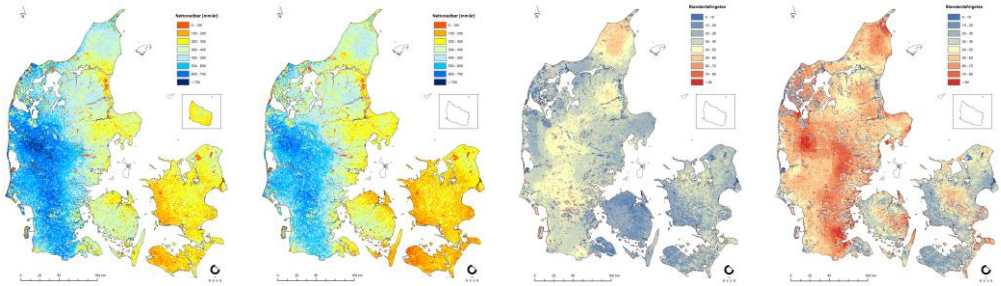
I Figur 67 vises middel (1990 – 2019) nettonedbør for DK-model HIP 100m sammen med median nettonedbør for fjern fremtid på tværs af 5 RCP4.5 og 17 RCP8.5 klimamodel realisationer. I Figur 68 er vist nettonedbør for de 22 klimamodelfremskrivninger, Tabel 19, samt standardafvigelsen på tværs af klimamodeller for fjern fremtid for de 5 RCP4.5 og 17 RCP8.5.



Figur 67: Nettonedbør for historisk 100m model, middel i perioden 1990 – 2019 (tv), i midten median nettonedbør for RCP4.5 fjern fremtid, th vises median nettonedbør for RCP8.5 fjern fremtid. Bemærk. Granskning har påvist en fejl i processering af klimafremskrivning for Bornholm, genberegning er igangsat og forventes implementeret i løbet af marts 2021.

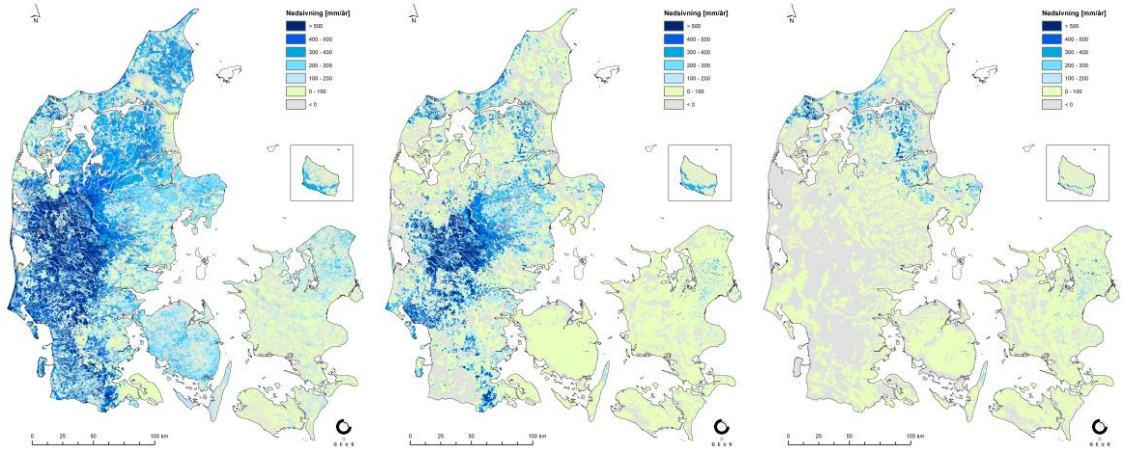
Generelt ses mere markant øget middel nettonedbør i fjern fremtid 2071-2100 i RCP8.5 i forhold til RCP4.5, og i forhold til historisk periode. For de 22 klimamodeller (c1-c22) ses betydelige forskelle blandt realisationer indenfor hvert emissionsscenarie i fjern fremtid, og disse forskelle er opsummeret i plot af standardafvigelser på tværs af modeller i RCP4.5 og RCP8.5.





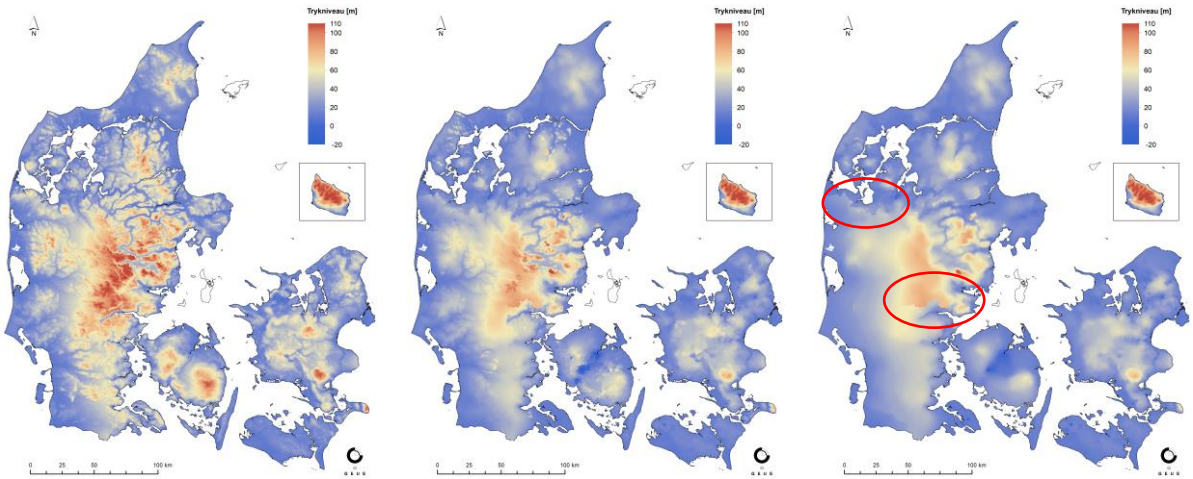
Figur 68: Middel nettonedbør for alle 22 klimascenarier fjern fremtid (c01 til c22 fra venstre til højre, Tabel 19), samt 2 figurer med fjern fremtid standardafvigelsen for RCP4.5 middel nettonedbør og RCP8.5 middel nettonedbør. Bemærk. Granskning har påvist en fejl i processering af klimafremskrivning for Bornholm, genberegning er igangsat og forventes implementeret i løbet af marts 2021.

Eksempler på nedsivning (middel) i perioden 1990 – 2019 præsenteres i Figur 69 for magasinlag, gwl1 (ks1), gwl3 (ks3) og gwl6 (kalken).



Figur 69: Middel nedsivning til ks1, ks3 og kalken i perioden 1990 – 2019.

Eksempler på simuleret trykniveau (middel) i perioden 1990 – 2019 præsenteres i Figur 70 for magasinlag, gwl1 (ks1), gwl3 (ks3) og gwl6 (kalken). Bemærk at der er trykforskelle ved modelafgrænsningsranden mellem DK4 og DK5 samt DK5 og DK6, markeret med rød cirkel i figuren. Det anbefales at være ekstra opmærksom når lokalmodeller opstilles hen over DK-model domæne områder.



Figur 70: Simuleret middeltrykniveau i perioden 1990 – 2019 for magasinlag, ks1, ks3 og kalken.

ACKNOWLEDGEMENT

Udover de nævnte forfattere på nærværende publikation skal der rettes en særlig tak til øvrige medarbejdere i Hydrologisk afdeling på GEUS, som på forskellig måde har bidraget konstruktivt til opgavens løsning. En særlig indsat er ydet af Mohsen Soltani, som har bidraget i forbindelse med klimafremskrivning af 500m modeller og 100m submodeller. Også tak Torben Sonnenborg og Jens Christian Refsgaard for væsentlige bidrag til intern kvalitetssikring at metodik og midtvejsreview rapport, samt til kvalitetssikring af arbejdet med performancevurdering og usikkerhed.

7. Reference liste

Adhikari, K., Kheir, R. B., Greve, M. B., Bøcher, P. K., Malone, B. P., Minasny, B., McBratney, A. B., and Greve, M. H.: High-Resolution 3-D Mapping of Soil Texture in Denmark, Soil Sci. Soc. Am. J., 9, e105519, https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0275, 201. »High-Resolution 3-D Mapping of Soil Texture in Denmark.« *Soil Science of America Journal*, 2013.

AIS. *https://www.dmu.dk/1_Viden/2_Miljoe-tilstand/3_samfund/AIS/index.htm.* 2000.

Arvidsen, A. G., et al. »Samling af geologiske modeller i Jylland - FOHM - Fælles Offentlig Hydrologisk Model.« Miljø- og Fødevareministeriet - Miljøstyrelsen, 2020.

Beven, K. J., og M. J. Kirkby. »A physically based, variable contributing area model of basin hydrology.« *Hydrological Sciences Bulletin*, 1979: 43-69.

DCA. »Den Danske Jordklassificering.« 2014.

—. »Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug .« 2020.

DHI A/S. »MIKE HYDRO River - User Guide.« 2020. 336 pages.

—. »MIKE SHE - User Guide and Reference Manual.« 2020. 822 pages.

DMI. *Klimaatlas.* 2020. https://www.dmi.dk/klima-atlas/data-i-klimaatlas/?paramtype=sea&maptype=kyst.

—. *Klimaatlas.* 2020. https://www.dmi.dk/klima-atlas/data-i-klimaatlas/ (senest hentet eller vist den 12. 12 2020).

Doherty, J. *Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models.* Watermark Numerical Computing, 2015.

Geodanmark. *Geodanmark.* 2019. Geodanmark.dk.

Gneiting, T., A. E. Raftery, A. H. Westveld, og T. Goldman. »Calibrated Probabilistic Forecasting Using Ensemble Model Output Statistics and Minimum CRPS Estimation.« *Monthly Weather Review*, 2005: 1098-1118.

Gupta, H. V., H. Kling, K. K. Yilmaz, og G. F. Martinez. »Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling.« *Journal of Hydrology*, 2009: 80-91.

Henriksen, H. J., et al. *Hydrologisk Geovejledning: God praksis i hydrologisk modellering, Geovejledning 2017/1.* De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, København: Miljøstyrelsen, 2017.

Hydroinform IT. *MikeSheTools.* 2017. http://hydroinform.dk/produkt/mikeshetools-mikezero-2017/ (senest hentet eller vist den 12. 12 2020).

Jacob, D., et al. »EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research.« *Regional Environmental Change*, 2014: 563–578.

Jakobsen, P. R., og L. Tougaard. »Danmarks digitale jordartskort 1:25000 - Version 5.0.« GEUS rapport 2020/18, GEUS, 2020.

Knoben, W. J. M., J. E. Freer, og R. Woods. »Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores.« *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 2019: 4323-4331.

Koch, J., Berger, H., Henriksen, H. J., and Sonnenborg, T. O. »Modelling of the shallow water table at high spatial resolution using random forests.« *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 2019: 23, 4603–4619, https://doi.org/10.5194/hess-23-4603-2019, 2019.

Landbrug og Fiskeri. 2020.

Levin, G., M.R. Jepsen, og M, Blemmer. »BASEMAP - Technical documentation of a model for elaboration of a land-use and land-cover map for Denmark.« Technical Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy No. 11, DCE, Aarhus University, 2012.

Møller, A. B., A. Beucher, B. V. Iversen, og M. H. Greve. »Predicting artificially drained areas by means of a selective model ensemble.« *Geoderma*, 2018: 30-42.

Pasten-Zapata, E., T. O. Sonnenborg, og J. C. Refsgaard. »Climate change: Sources of uncertainty in precipitation and temperature projections for Denmark.« *GEUS Bulletin*, 2019.

Pedersen, S. S. A., B. Hermansen, C. Nathan, og L. Tougaard. »Digtalt kort over Danmarks jordarter 1:200.000, version 2 - Geologisk kort over de overfladenære jordarter i Danmark.« GEUS rapport 2011/19, GEUS, 2011/19.

Schneider, R., H. J. Henriksen, og S. Stisen. »A robust objective function for calibration of groundwater models in light of deficiencies of model structure and observations.« *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2020.

Stisen, S., M. Ondracek, L. Troldborg, R. Schneider, og M.J Van Til. *National Vandressource Model - Modelopstilling og kalibrering af DK-model 2019.* Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2019/31, Afdeling for Hydrologi, GEUS, GEUS, 2019.

Stisen, S., R. Schneider, M. Ondracek, og H. J. Henriksen. *Modellering af terrænnært grundvand, vandstand i vandløb og vand på terræn for Storå og Odense Å. Slutrapport (FODS 6.1 Fasttrack metodeudvikling).* GEUS, GEUS, 2018, 170.